



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FARMACOLOGIA E BIOQUÍMICA

IAGO CASTRO DA SILVA

**EFEITO DA TEMPERATURA E MOLARIDADE NA  
AVALIAÇÃO DAS ATIVIDADES ANTIMICROBIANA,  
CITOTÓXICA E ANTIOXIDANTE DO BIO-ÓLEO DA  
SEMENTE DO AÇAÍ (*EUTERPE OLERACEA*, MART.).**

BELÉM-PA

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FARMACOLOGIA E BIOQUÍMICA

**EFEITO DA TEMPERATURA E MOLARIDADE NA  
AVALIAÇÃO DAS ATIVIDADES ANTIMICROBIANA,  
CITOTÓXICA E ANTIOXIDANTE DO BIO-ÓLEO DA  
SEMENTE DO AÇAÍ (*EUTERPE OLERACEA*, MART.).**

Autor(a): IAGO CASTRO DA SILVA

**Orientador(a): Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> MARTA CHAGAS MONTEIRO**

**Coorientador(a): Prof. Dr. NÉLIO TEIXEIRA MACHADO**

Documento de Dissertação apresentada  
ao Programa de Pós-graduação em  
Farmacologia e Bioquímica do Instituto  
de Ciências Biológicas da Universidade  
Federal do Pará como requisito para a  
obtenção do título de Mestre em  
Farmacologia e Bioquímica.

BELÉM-PA

2024

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)  
autor(a)**

---

C355e Castro da Silva, Iago.  
Efeito da temperatura e molaridade na avaliação das  
atividades antimicrobiana, citotóxica e antioxidante do bio-óleo  
da semente do açaí (*Euterpe oleracea*, Mart.) /  
Iago Castro da Silva. — 2024.  
117 f. : il. color.

Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dra. Marta Chagas Monteiro  
Coorientador(a): Prof. Dr. Nélio Teixeira Machado  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Ciências Biológicas, Programa de Pós-  
graduação em Farmacologia e Bioquímica, Belém, 2024.

1. Açaí. 2. Bio-óleo. 3. Pirólise. I. Título.

CDD 570

---

## DEDICATÓRIA/AGRADECIMENTOS

Queria agradecer primeiramente a Deus por ter me dado forças para concluir esse Mestrado. A vontade de desistir foi grande, mas em meio a tantos problemas pessoais ele sempre esteve comigo.

À Universidade Federal do Pará e ao Programa de Pós-Graduação em Farmacologia e Bioquímica pela oportunidade de poder me aperfeiçoar profissionalmente.

A professora Dr.<sup>a</sup> Marta Chagas Monteiro e ao Professor Dr<sup>o</sup> Nélio Teixeira Machado, pela orientação e por ter aberto as portas de seus respectivos laboratórios para eu poder desenvolver a pesquisa de Mestrado. Assim como seu auxílio na minha formação como profissional.

A minha mãe Ester Ribeiro, que em meio a tantas dificuldades que enfrentamos no decorrer das nossas vidas, sempre me incentivou a continuar estudando e a nunca desistir, mesmo que as circunstâncias me obrigassem a isso.

Ao meu irmão, Pedro Castro, por ser um dos apoios na minha vida. Obrigado por tudo.

Agradeço também as minhas amigas de laboratório Amanda Monteiro, Ana Holanda, Sara Kerolim e Luany Seabra, que sempre estavam me ajudando com apoio psicológico e como ombro amigo nos momentos mais difíceis desta trajetória.

A amiga e irmã que conquistei no mestrado Pamela Seabra, eu não sei o que seria de mim sem a sua ajuda e apoio nos momentos difíceis. Obrigado amiga.

Ao meu amor, Walice Rans, pelo companheirismo, apoio e ajuda durante todo esse período. Você foi fundamental nesse processo. Obrigado por tudo.

A minha amiga de graduação de longa data Luana Silva, que sempre esteve me apoiando e me dando forças para não desistir.

Obrigado a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para conclusão deste trabalho.

## RESUMO

O açaí, uma fruta da Amazônia, é valioso tanto do ponto de vista econômico quanto nutricional. Suas sementes, geralmente descartadas, podem ser transformadas em bio-óleo por meio da pirólise (Processo de degradação termoquímica de biomassa residual), oferecendo uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis. Este estudo investiga como a temperatura e a molaridade com Hidróxido de Potássio (KOH) e Ácido clorídrico (HCl) que são reagentes de impregnação química no processo, influenciam as atividades antimicrobiana, antioxidante e citotóxica do bio-óleo produzido. Foram realizados testes utilizando Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (CG-MS) e ensaios para avaliar a atividade antimicrobiana, antioxidante e citotóxica em diferentes temperaturas (350, 400 e 450 °C) e molaridades (0,5 M, 1,0 M e 2,0 M). Os compostos fenólicos foram os mais abundantes no bio-óleo (55,70%), seguidos por hidrocarbonetos cíclicos e aromáticos (11,89%) e hidrocarbonetos lineares (9,64%). Apesar da redução nos compostos oxigenados, o bio-óleo manteve atividade bacteriostática contra *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* em várias faixas de temperatura, destacando-se a 350 °C. A atividade antioxidante foi maior a 350 °C e em molaridades menores. Além disso, concentrações mais baixas de impregnação ácida apresentaram efeito citotóxico em altas temperaturas. Assim, o bio-óleo de sementes de açaí gerados pelo processo de pirólise demonstra potencial para atividades antioxidantes e antimicrobianas, sugerindo viabilidade para testes adicionais em diluições com menor citotoxicidade.

**Palavras-chave:** Açaí. Bio-óleo. Pirólise

## ABSTRACT

Açaí, a fruit from the Amazon, is valuable both economically and nutritionally. Its seeds, which are typically discarded, can be converted into bio-oil through pyrolysis (a process of thermochemical degradation of residual biomass), offering a sustainable alternative to fossil fuels. This study explores how temperature and molarity with Potassium Hydroxide (KOH) and Hydrochloric Acid (HCl), which are chemical impregnation reagents in the process, affect the antimicrobial, antioxidant, and cytotoxic activities of the produced bio-oil. Tests were conducted using Gas Chromatography coupled with Mass Spectrometry (GC-MS) and assays to evaluate antimicrobial, antioxidant, and cytotoxic activities at different temperatures (350, 400, and 450 °C) and molarities (0.5 M, 1.0 M, and 2.0 M). Phenolic compounds were the most abundant in the bio-oil (55.70%), followed by cyclic and aromatic hydrocarbons (11.89%) and linear hydrocarbons (9.64%). Despite a reduction in oxygenated compounds, the bio-oil retained bacteriostatic activity against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* across various temperature ranges, with notable effectiveness at 350 °C. Antioxidant activity was highest at 350 °C and at lower molarities. Furthermore, lower concentrations of acidic impregnation exhibited cytotoxic effects at high temperatures. Thus, bio-oil from açaí seeds generated through pyrolysis shows potential for antioxidant and antimicrobial activities, suggesting feasibility for further testing in dilutions with lower cytotoxicity.

**Keywords:** Acai.Bio-oil.Pyrolysis

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

**FIGURA 01:** Um cacho de frutos de *Euterpe oleracea* (A) e uma seção transversal de um fruto (B). Palmeira de *Euterpe Oleracea*

**FIGURA 02:** Descarte inadequado de resíduos de biomassa de frutos de açai em Belém do Pará

**FIGURA 03:** Estrutura da biomassa lignocelulósica

**FIGURA 04:** Processos de conversão de biomassa, produtos e aplicações

**FIGURA 05:** Mecanismo e distribuição dos produtos no processo de pirólise rápida.

**FIGURA 06:** Esquema do fluxo do processo de produção de bio-óleo por pirólise de sementes de Açai a 350, 400 e 450 °C, 1,0 atm., 2,0 M de KOH e HCL 450 °C, 1,0 atm., 0,5 M, 1,0 M e 2,0 M de KOH, usando um reator de leito fixo. em escala de laboratório.

**FIGURA 07:** Rendimento dos produtos da reação (bio-óleo, H<sub>2</sub>O, biocarvão, gás) por pirólise das sementes de açai (*Euterpe oleracea*, Mart) na faixa de temperatura de 350-450 °C.

**FIGURA 08:** Concentração de hidrocarbonetos acíclicos saturados/insaturados (alcanos + alquenos) e 419 hidrocarbonetos heterocíclicos (cicloalcanos + cicloalquenos + aromáticos) no bio-óleo obtido por pirólise de sementes de Açai (*Euterpe oleracea*, Mart) na faixa de temperatura de 350-450 °C.

**FIGURA 09:** A concentração de oxigenados (fenóis, cetonas e ésteres) no bio-óleo obtido pela pirólise de sementes de açai (*Euterpe oleracea*, Mart) variou na faixa de temperatura de 350-450 °C.

**FIGURA 10:** Rendimento dos produtos da reação (bio-óleo, H<sub>2</sub>O, biocarvão, gás) por pirólise de sementes de Açai (*Euterpe oleracea*, Mart), a 450 °C, 1,0 atmosfera, ativadas com KOH 0,5 M, 1,0 M e 2,0 M, em escala laboratorial.

**FIGURA 11:** Concentrações de hidrocarbonetos e oxigenados no bio-óleo obtido pela pirólise de sementes de açai (*Euterpe oleracea*, Mart) a 450 °C e 1,0 atmosfera, utilizando diferentes concentrações de KOH (0,5-2,0 M).

**FIGURA 12 :** Possível caminho da reação química durante a pirólise da biomassa com aditivos alcalinos.

**FIGURA 13:** Bio-óleo extraído de biomassa pirolítica

**FIGURA 14:** Estrutura química dos compostos fenólicos encontrados no bio-óleo de bétula de madeira: (a) syringol (b) guaiacol, (c) isoeugenol, (d) homovanillic acid

**FIGURA 15:** Ensaio de hemólise

**FIGURA 16 :** Mecanismos e sítios de ação dos óleos essenciais e seus compostos nas células bacterianas.

**FIGURA 17:** Sementes de Açaí após o pré-tratamento físico. (a). Semente obtida. (b). Sementes secas. (c). Sementes moídas. (d). Sementes peneiradas.

**FIGURA 18:** Sementes de Açaí Impregnadas úmidas (a) Fase aquosa (b); (c) Secas

**FIGURA 19:** Esquema de pirólise em escala laboratorial

**FIGURA 20:** Esquema da obtenção das amostras

**FIGURA 21:** Etapas da diluição da fração orgânica

**FIGURA 22:** Esquema da atividade antioxidante pelo método do sequestro do radical ABTS<sup>•+</sup> (TEAC)

**FIGURA 23:** Avaliação da atividade antioxidante pelo método do sequestro do radical DPPH<sup>•</sup>

**FIGURA 24:** Esquema da atividade antimicrobiana

**FIGURA 25:** Delineamento experimental da obtenção de PBMC.

**FIGURA 26:** Avaliação da viabilidade celular por Azul de Trypan. (A) Células viáveis e não viável (B) Monócito viável na amostra (100x).

**FIGURA 27:** Capacidade antioxidante total (TEAC) da fase aquosa obtida via pirólise de sementes de açaí + fibra, ativada quimicamente com soluções de ácido clorídrico (HCl) 2M a temperaturas de 350, 400 e 450°C em escala laboratorial.

**FIGURA 28:** Capacidade antioxidante total (TEAC) da fase orgânica (Bio-óleo) obtida via pirólise de sementes de açaí + fibra, ativada quimicamente com soluções de Hidróxido de potássio (KOH) 2M a temperaturas de 350 e 400°C em escala laboratorial.

**FIGURA 29:** Capacidade antioxidante total (TEAC) da fase aquosa obtida via pirólise de sementes de açaí + fibra, ativada quimicamente com soluções de Hidróxido de potássio (KOH) 450°C a molaridades de 0.5 M, 1.0 M e 2.0 M em escala laboratorial.

**FIGURA 30:** Capacidade antioxidante total (TEAC) da fase aquosa obtida via pirólise de sementes de açaí + fibra, ativada quimicamente com soluções de Hidróxido de potássio (KOH) 450°C a molaridades de 0.5 M, 1.0 M em escala laboratorial.

**FIGURA 31:** Capacidade antioxidante pelo método de 1,1-difenil-2-picrilhidrazil (DPPH•) da fase aquosa obtida via pirólise de sementes de açaí + fibra, ativada quimicamente com soluções de Hidróxido de potássio (KOH) 2.0 M a Temperaturas de 350°C e 400°C em escala laboratorial

**FIGURA 32:** Capacidade antioxidante pelo método de 1,1-difenil-2-picrilhidrazil (DPPH•) da fração orgânica do bio-óleo obtido via pirólise de sementes de açaí + fibra, ativada quimicamente com soluções de Hidróxido de potássio (KOH) 2.0 M a Temperaturas de 350°C e 400°C em escala laboratorial

**FIGURA 33:** Capacidade antioxidante pelo método de 1,1-difenil-2-picrilhidrazil (DPPH•) da fração aquosa do bio-óleo obtido via pirólise de sementes de açaí + fibra, ativada quimicamente com soluções de Hidróxido de potássio (KOH) em diferentes molaridades(0.5 M- 2.0 M) a temperatura de 450°C em escala laboratorial.

**FIGURA 34:** Capacidade antioxidante pelo método de 1,1-difenil-2-picrilhidrazil (DPPH•) da fração orgânica do bio-óleo obtido via pirólise de sementes de açaí + fibra, ativada quimicamente com soluções de Hidróxido de potássio (KOH) em diferentes molaridades(0.5 M- 2.0 M) a temperatura de 450°C em escala laboratorial.

**FIGURA 35:** Concentração bactericida mínima (CBM): a-c) correspondente a água de lavagem; d-f) Fração aquosa; g-i) Fração orgânica; frente à cepa de *Escherichia coli*.

**FIGURA 36:** Concentração bactericida mínima (CBM): a-c) correspondente a água de lavagem; d-f) Fração aquosa; g-i) Fração orgânica; frente à cepa de *Staphylococcus aureus*

**FIGURA 37:** Viabilidade celular em percentagem de PBMC após incubação com as frações aquosas impregnadas com HCl ou não em diferentes temperaturas e diluições. (A) Fração aquosa impregnada com 2,0M de HCl sob 350°C (B) Fração aquosa impregnada com 2,0M de HCl sob 400°C (C) Fração aquosa impregnada com 2,0M de HCl sob 450°C (D) Fração aquosa impregnada com 0,50M de HCl sob 450°C (E) Fração aquosa impregnada com 1,0M de HCl sob 450°C (F) Número de células/mL nas frações aquosas HT1, HT2 e HC3.

**FIGURA 38:** Viabilidade celular em percentagem de PBMC após incubação com a fração orgânica não impregnada, obtida via pirólise a 450°C

## LISTA DE TABELAS

**TABELA 01:** Rendimentos típicos obtidos para diversos tipos de pirólise

**TABELA 02:** Concentração inibitória mínima (CIM) e Concentração biocida mínima (CBM) da mistura (bio-óleo+B10) para os inóculos testados

**TABELA 03:** Composição química do bio-óleo obtido através da pirólise de sementes do açaí a 450°C

**TABELA 04:** Composição química do bio-óleo e da fase aquosa obtida através da pirólise do açaí ativado quimicamente com solução de KOH 2,0M a 450°C.

**TABELA 05:** Composição química da fase aquosa obtida por pirólise de sementes de açaí (Euterpe Oleracea, Mart), identificada por CG-MS

**TABELA 06:** Capacidade antioxidante dos bio-óleos obtidos pela pirólise de sementes de açaí (Euterpe oleracea, Mart)

**TABELA 07:** Capacidade antioxidante de bio-óleos obtidos por pirólise de sementes de Açaí (Euterpe oleracea, Mart), com diferentes molaridades (solução de KOH de 0,5-2,0 M), a 450° C

**TABELA 08:** Capacidade antioxidante da fase aquosa de bio-óleos obtidos por pirólise de sementes de Açaí (Euterpe oleracea, Mart), com diferentes temperaturas, (350°C e 400°) ativada quimicamente com KOH 2.0 M em escala laboratorial

**TABELA 09:** Capacidade antioxidante dos bio-óleos obtidos pela pirólise de sementes de açaí (Euterpe oleracea, Mart) pelo método de TEAC.

**TABELA 10:** Capacidade antioxidante da fase aquosa de bio-óleos obtidos por pirólise de sementes de Açaí (Euterpe oleracea, Mart), com diferentes temperaturas, (350°C e 400°) ativada quimicamente com KOH 2.0 M em escala laboratorial.

**TABELA 11:** Capacidade antioxidante da fração orgânica de bio-óleos obtidos por pirólise de sementes de Açaí (Euterpe oleracea, Mart), com diferentes temperaturas, (350°C e 400°) ativada quimicamente com KOH 2.0 M em escala laboratorial.

**TABELA 12:** Capacidade antioxidante da fração aquosa de bio-óleos obtidos por pirólise de sementes de Açaí (Euterpe oleracea, Mart), ativada quimicamente com KOH 2.0 M com diferentes molaridades (0.5 M- 2.0 M) a 450°C em escala laboratorial

**TABELA 13:** Capacidade antioxidante da fração aquosa de bio-óleos obtidos por pirólise de sementes de Açaí (Euterpe oleracea, Mart), ativada quimicamente com KOH 2.0 M com diferentes molaridades (0.5 M- 2.0 M) a 450°C em escala laboratorial.

**TABELA 14:** Concentrações mínimas inibitórias e bactericidas de água de lavagem da pirólise das sementes de açaí impregnadas com KOH frente a cepa *Escherichia coli*.

**TABELA 15:** Concentrações mínimas inibitórias e bactericidas da fração aquosa do bio-óleo da pirólise das sementes de açaí impregnadas com KOH e HCL frente a cepa *Escherichia coli*.

**TABELA 16:** Concentrações mínimas inibitórias e bactericidas da fração orgânica do bio-óleo da pirólise das sementes de açaí impregnadas com KOH frente a cepa *Escherichia coli*.

**TABELA 17:** Concentrações mínimas inibitórias e bactericidas de água de lavagem da pirólise das sementes de açaí impregnadas com KOH frente a cepa *Staphylococcus aureus*.

**TABELA 18:** Concentrações mínimas inibitórias e bactericidas da fração aquosa do bio-óleo da pirólise das sementes de açaí impregnadas com KOH frente a cepa de *Staphylococcus aureus*

**TABELA 19:** Concentrações mínimas inibitórias e bactericidas da fração orgânica do bio-óleo da pirólise das sementes de açaí impregnadas com KOH frente a cepa *Staphylococcus aureus*

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

CG-MS	Cromatografia Gasosa acoplada Espectrometria de Massas
KOH	Hidróxido de Potássio
M	Molar
TEAC	Capacidade antioxidante equivalente ao trolox
DPPH	2,2-difenil-1-picril-hidrazina
CIM	Concentração Inibitória mínima
CBM	Concentração Bactericida mínima
g	Gramas
LDL	Lipoproteína de Baixa densidade
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CO	Monóxido de Carbono
NaOH	Hidróxido de sódio
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Ácido Fosfórico
HNO <sub>3</sub>	Ácido Nítrico
HCL	Ácido clorídrico
K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	Persulfato de Potássio
°C	Celsius
atm.	Atmosfera
mL	Mililitros
W	Watts
PLO	Produto Líquido Orgânico
DMSO	Dimetilsulfóxido
UFC	Unidades formadoras de colônia
PBMC	células mononucleares do sangue periférico
RPMI	Roswell Park Memorial Institute

RMN	Ressonância Magnética Nuclear
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
LC50	Dose letal
μ	Micro
LAESA	Laboratório de Engenharia Sanitária e ambiental
CLSI	Clinical and Laboratory Standards Institute
AMH	Ágar Mueller Hinton
ESBLs	Extended Spectrum β-lactamases
TBHQ	terc-butil hidroquinona
BHT	butil-hidroxi-

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
3.1 O açaí ( <i>Euterpe Oleracea, Mart.</i> ) .....	4
3.2 Composição da semente do açaí.....	6
3.3. Geração e reutilização de resíduos do açaí.....	8
3.3.1. Biomassa lignocelulósica da semente do açaí .....	10
3.4. Processos de conversão de biomassa.....	12
3.5. Processo de pirólise de frutos amazônicos. ....	16
3.5.1. Efeito da temperatura no processo .....	18
3.5.2. Efeito da molaridade no processo.....	22
3.6. Bio-óleos.....	25
3.7. Atividades biológicas de resíduos de biomassa de açaí .....	27
3.7.1. Capacidade antioxidante dos resíduos de biomassa .....	27
3.7.2. Ação antimicrobiana e citotóxica dos derivados do açaí e seus resíduos. ...	31
3.7.3. Mecanismos de ação de óleos e seus compostos. ....	36
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>38</b>
4.1. Processo de produção do bio-óleo.....	38
4.1.1. Pré-tratamento físico das sementes de açaí ( <i>euterpe oleracea, mart.</i> ).....	38
4.1.2. Pré-tratamento químico das sementes de açaí ( <i>euterpe oleracea, mart.</i> ).....	39
4.1.3. Aparato experimental .....	40
4.1.4. Procedimentos experimentais. ....	41
4.2. Obtenção do bio-óleo.....	42
4.2. Preparo das amostras de bio-óleo .....	43
4.2.1. Água de lavagem. ....	43
4.2.2. Fração aquosa .....	43
4.2.3. Fração orgânica .....	43
4.3. Identificação dos componentes por cromatografia gasosa (CG-MS). ....	44
4.4. Avaliação do potencial antioxidante do bio-óleo .....	44
4.4.1 Avaliação da atividade antioxidante utilizando o método de eliminação de radicais ABTS•+ (TEAC).....	44

4.4.2. Avaliação da atividade antioxidante pelo método de sequestro do radical DPPH•.....	46
4.5. Avaliação da atividade antimicrobiana do bio-óleo .....	47
4.6. Ensaio de viabilidade celular.....	48
4.6.1. Comitê de ética .....	48
4.6.2. Obtenção de células mononucleares do sangue periférico(PBMC).....	49
4.6.3. Método de exclusão do corante azul de tripan e avaliação da morfologia celular .....	49
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>51</b>
5.1. Identificação dos componentes por Cromatografia Gasosa (CG-MS).....	51
5.1.1. Efeito da temperatura na composição química dos produtos.....	56
5.2. Avaliação do potencial antioxidante do bio-óleo .....	57
5.2.1. Efeito da temperatura na atividade antioxidante do bio-óleo usando o método TEAC .....	57
5.2.2. Efeito da concentração molar na atividade antioxidante do bio-óleo usando o método TEAC .....	61
5.2.3. Efeito da temperatura na atividade antioxidante do bio-óleo usando o método de DPPH.....	64
5.2.4. Efeito da concentração molar na atividade antioxidante do bio-óleo usando o método DPPH.....	69
5.3. Avaliação da atividade antimicrobiana do bio-óleo .....	72
5.3.1. Atividade frente À <i>Escherichia coli</i> .....	72
5.3.2. Atividade frente À <i>Staphylococcus aureus</i> .....	78
5.4. Ensaio de viabilidade celular.....	83
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>88</b>
<b>7. REFERÊNCIAS. ....</b>	<b>89</b>
<b>8. COMPROVANTE DE SUBMISSÃO/ACEITE DE ARTIGO CIENTÍFICO .....</b>	<b>103</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O açaí (*Euterpe oleracea*) é uma fruta típica da região amazônica, valorizada por suas propriedades nutricionais e seu papel na economia local. As sementes, frequentemente descartadas após a extração da polpa, são uma fonte subutilizada que pode ser aproveitada por meio da pirólise — um processo térmico que transforma biomassa em bio-óleo, gás e carvão em ausência de oxigênio. O bio-óleo obtido dessa forma apresenta grande potencial como uma alternativa sustentável a combustíveis fósseis e pode ser utilizado em diversas aplicações industriais e energéticas. (Cedrim et al., 2018; De Castro et al., 2019; Valois et al., 2023).

O bio-óleo, um subproduto da pirólise da biomassa, tem ganhado destaque nas últimas décadas devido ao seu potencial como fonte renovável de energia e de compostos bioativos. Entre as diversas fontes de biomassa, as sementes do açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) se mostram particularmente promissoras, não apenas pela sua abundância na Amazônia, mas também pela rica composição química que pode ser extraída delas. (Bonomo et al., 2014; Menezes et al., 2008; Bernaud e Funchal, 2011; Cedrim et al., 2018; Yamaguchi et al., 2015; Tavares et al., 2020). O estudo das propriedades do bio-óleo derivado dessas sementes abre novas perspectivas para aplicações em diversas áreas, especialmente na indústria farmacêutica, alimentícia e química. (Valois et al., 2023; De Castro et al., 2019; Bufalino et al., 2018; Guerreiro et al., 2022; Komaiko et al., 2016; Filho et al., 2023; Pozo et al., 2004; Rocha et al., 2015).

A temperatura e a molaridade são parâmetros fundamentais que influenciam de maneira significativa a composição e as propriedades do bio-óleo. A temperatura de pirólise desempenha um papel crucial na degradação da biomassa e na formação de compostos desejáveis. Por sua vez, a molaridade impacta a solubilidade e a reatividade dos compostos extraídos. Compreender como esses fatores interagem é essencial para otimizar a produção e utilização do bio-óleo, especialmente em aplicações que demandam atividades biológicas específicas. Essa compreensão pode abrir novas oportunidades para o aproveitamento deste recurso em diversas indústrias. (Zang et al., 2007; De Castro et al., 2009; Valdez et al., 2023; Kumar et al., 2010; Heo et al., 2010; Xu et al., 2010; Serrão et al., 2021; Sato et al., 2019; Nascimento et al., 2020).

As possíveis atividades antimicrobianas do bio-óleo e de outros produtos naturais derivados da biomassa de açaí são de grande relevância, especialmente diante do crescente problema da resistência microbiana aos antibióticos convencionais. Estudos demonstram que compostos naturais podem oferecer uma alternativa eficaz e menos prejudicial para o tratamento de infecções. Portanto, investigar como a temperatura e a molaridade no processo pirolítico influenciam essas atividades biológicas é crucial para o desenvolvimento de novos agentes antimicrobianos a partir de fontes naturais, como o bio-óleo de açaí. (Silva et al., 2023; Kuskoski et al., 2002; Alasalvar et al., 2005; filho & pereira, 2012; Rogez et al., 2012; Sato et al., 2021).

Além das propriedades antimicrobianas, as atividades citotóxicas do bio-óleo são igualmente relevantes. A avaliação da citotoxicidade é fundamental para assegurar a segurança dos compostos em potencial para uso terapêutico. A relação entre temperatura, molaridade e toxicidade celular é um aspecto que merece maior investigação, garantindo que os produtos derivados do bio-óleo sejam não apenas eficazes, mas também seguros para o consumo. (Kuskoski et al., 2002; Alasalvar et al., 2005). Outro ponto importante é a atividade antioxidante do bio-óleo, dada a crescente atenção aos compostos antioxidantes e seus efeitos benéficos à saúde, é essencial compreender como temperatura e molaridade influenciam essa atividade. Compostos antioxidantes desempenham um papel significativo na prevenção de doenças crônicas, e uma extração eficaz é crucial para maximizar os benefícios do bio-óleo. (Barbosa et al., 2019; Valois et al., 2023; Valdez et al., 2023).

Partindo desses princípios, este trabalho teve como intuito investigar detalhadamente o efeito da temperatura e da molaridade na atividade antimicrobiana, citotóxica e antioxidante do bio-óleo extraído das sementes de açaí. Por meio de uma análise abrangente, buscou-se contribuir para a compreensão das interações entre esses parâmetros, fornecendo informações valiosas que podem auxiliar no desenvolvimento de produtos inovadores e sustentáveis no campo farmacêutico.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a atividade antimicrobiana do bio-óleo da semente do açaí (*Euterpe Oleracea, Mart.*), seu possível potencial antioxidante e a sua citotoxicidade, sob efeito de diferentes temperaturas e molaridades.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar analiticamente os componentes presentes no Bio-óleo da semente de açaí por meio do método de Cromatografia Gasosa acoplada Espectrometria de Massas (CG-MS);
- Analisar o potencial antioxidante do bio-óleo da semente do açaí com tratamento químico com KOH e HCL em diferentes temperaturas ( 350, 400 e 450°C) e molaridades ( 0.5 M, 1.0 M e 2.0 M) por meio dos ensaios de radical TEAC e DPPH;
- Avaliar a atividade antimicrobiana do bio-óleo da semente do açaí com tratamento químico com KOH e HCL e em diferentes temperaturas ( 350 , 400 e 450°C) e molaridades ( 0.5 M, 1.0 M e 2.0 M) frente às bactérias gram-negativas (*Escherichia coli* - ATCC 25922) e gram-positivas (*Staphylococcus aureus*- ATCC 29213) , pela técnica de microdiluição para identificação de CIM (Concentração Inibitória Mínima) e CBM (Concentração Bactericida Mínima).
- Analisar a citotoxicidade do bio-óleo da semente do açaí com tratamento químico com KOH e HCL em diferentes temperaturas ( 350, 400 e 450°C) e molaridades ( 0.5 M, 1.0 M e 2.0 M) pelo método adaptado de exclusão de azul de tripano e centrifugação por densidade.

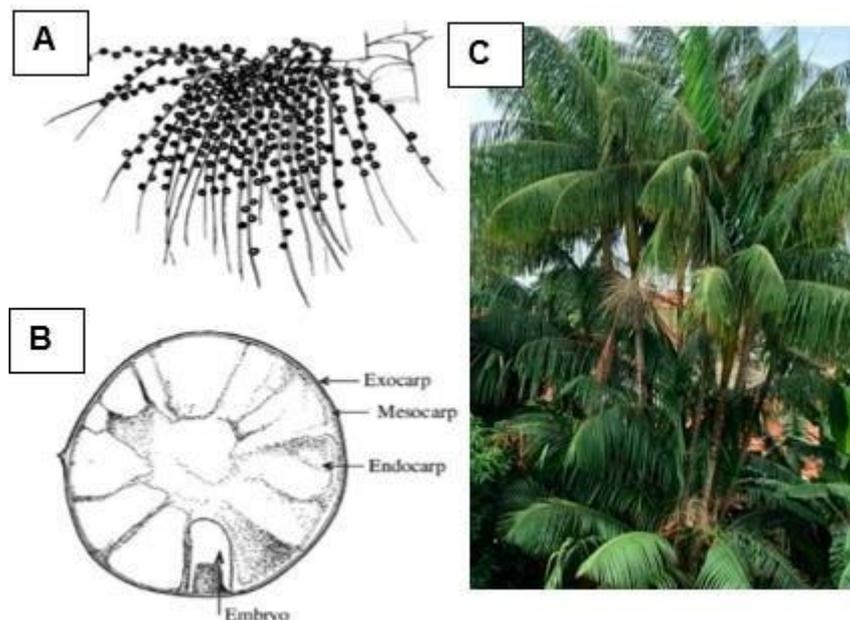
### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1. O Açaí (*Euterpe oleracea*, Mart.)

O açaí (*Euterpe oleracea* Mart.), uma palmeira nativa da América Central e do Sul, é amplamente reconhecido como a palmeira mais produtiva da região amazônica. Este fruto exótico desempenha um papel crucial na dieta de várias comunidades no Brasil, servindo como um alimento básico. Nos últimos anos, o açaí ganhou destaque global como um superalimento funcional, notável por seu alto valor nutricional e propriedades terapêuticas. Ele é rico em antioxidantes e apresenta uma composição fitoquímica diversificada, que inclui antocianinas, flavonoides e outros compostos bioativos benéficos à saúde (Valois et al., 2023; Valdez et al., 2023). Além de seu valor nutricional, o açaí é vital para a economia da região amazônica. A produção do açaí é um importante motor econômico, com diversas formas de comercialização, como polpa pura, polpa com açúcar, ou acompanhada de farinha de mandioca ou tapioca. Essas variantes refletem a versatilidade do fruto e sua integração nas tradições alimentares locais (Bonomo et al., 2014; Menezes et al., 2008; Bernaud & Funchal, 2011; Cedrim et al., 2018; Valois et al., 2023).

O gênero *Euterpe*, ao qual o açaí pertence, inclui aproximadamente 28 espécies vegetais na bacia Amazônica (Santana et al., 2020). Entre essas espécies, *Euterpe oleracea* é a mais conhecida e cultivada comercialmente, enquanto *Euterpe precatoria* e *Euterpe edulis* também têm importância, embora menos destacada. A *Euterpe precatoria*, caracterizada por seu único estipe (caule) e frutos menores, é encontrada predominantemente na Amazônia ocidental. Em contraste, *Euterpe oleracea* é mais comum em regiões de terras baixas e florestas alagadas dos estados do Pará, Maranhão e Tocantins. As diferenças morfológicas entre essas espécies influenciam seu uso e valor comercial, com *E. oleracea* sendo preferida por suas características de crescimento e produção em massa. A morfologia dos frutos dessas espécies pode ser visualizada na Figura 1 (Rogez & Pompeu, 2009; Yamaguchi et al., 2015; Santana et al., 2020; Valois et al., 2023).

**Figura 1.** Um cacho de frutos de *Euterpe oleracea* (A) e uma seção transversal de um fruto (B).  
Palmeira de *Euterpe Oleracea* (C).



**Fonte:** Adaptado de Rogez & Pompeu (2009) e Xavier et al., (2021).

Atualmente, o Brasil se destaca como o principal produtor, consumidor e exportador global de açaí. O país tem consolidado sua liderança nesse mercado promissor por meio de investimentos estratégicos, que incluem a expansão das áreas de cultivo e o aprimoramento da capacitação de profissionais no setor. Esse desenvolvimento é crucial para garantir a sustentabilidade e a continuidade do crescimento da indústria do açaí, que tem se expandido tanto nas grandes cidades brasileiras quanto em mercados internacionais (Menezes et al., 2008; Cedrim et al., 2018; Valois et al., 2023).

No Brasil, o açaí é consumido de várias maneiras, incluindo como bebida energética devido ao seu perfil nutricional denso. Além disso, é oferecido em diferentes formatos, como polpas congeladas, xaropes, cremes, pós e sorvetes. Essa diversidade de produtos reflete a capacidade do açaí de se adaptar a diferentes preferências e necessidades nutricionais. No mercado internacional, o açaí é frequentemente posicionado como um produto exótico e saudável, atraindo consumidores que buscam experiências alimentares inovadoras e benéficas para a saúde. Países como Japão, China, Estados Unidos e diversas nações europeias têm mostrado crescente interesse por esse fruto, evidenciado pela presença de produtos

derivados de açaí em supermercados e lojas especializadas (Darnet et al., 2011; Yamaguchi et al., 2015; Cedrim et al., 2018).

A versatilidade do açaí não se limita ao seu uso culinário; ele também é valorizado por suas propriedades funcionais. Estudos têm destacado seus benefícios para a saúde, como suas propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias, o que contribui para seu apelo no mercado global. A crescente demanda por alimentos naturais e funcionais impulsiona a inovação e a diversificação dos produtos à base de açaí, reafirmando seu papel tanto no contexto local quanto internacional. (Rogez & Pompeu, 2009; Cedrim et al., 2018; Valois et al., 2023).

### **3.2. Composição da semente do açaí**

A extração do açaí gera resíduos sólidos, como caroços e fibras, que frequentemente são descartados de forma inadequada. De acordo com a Lei Federal nº 12.305/10, que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os caroços de açaí são classificados como resíduos provenientes de atividades comerciais. A legislação atribui a responsabilidade pela coleta e destinação desses resíduos aos próprios geradores, os batedores de açaí, e não às empresas de coleta de resíduos urbanos. No entanto, na prática, os caroços de açaí são frequentemente abandonados a céu aberto e sem tratamento adequado, o que pode levar a problemas ambientais significativos, como o acúmulo de resíduos em ruas e terrenos baldios, a formação de depósitos clandestinos e até mesmo assoreamento e alagamentos em áreas urbanas. Além disso, o descarte inadequado contribui para as mudanças climáticas, pois a decomposição dos caroços emite gases de efeito estufa, como metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Santos, Pasolini e Costa, 2023).

A reutilização dos caroços de açaí é crucial para mitigar esses impactos ambientais. As fibras naturais, derivadas dos caroços, têm se mostrado uma alternativa promissora em diversos setores, principalmente por sua origem renovável e suas vantagens sobre as fibras sintéticas. Elas oferecem a possibilidade de reaproveitamento, reduzindo a geração de resíduos, e são biodegradáveis, além de apresentarem excelentes propriedades, como alta resistência, rigidez aumentada e menor custo de processamento. Esses atributos não apenas beneficiam o meio ambiente, ao reduzir o desperdício e a poluição, mas também proporcionam uma

redução no desgaste de maquinários devido à facilidade de manuseio (Santos, Pasolini e Costa, 2023).

Estudos recentes destacam o potencial dos caroços de açaí para a produção de biocarvão e açúcares fermentáveis. O trabalho de Sato et al. (2019) demonstrou que o biocarvão derivado do caroço de açaí possui propriedades úteis, como alta hidrofobicidade e baixa quantidade de cinzas, indicando boa eficiência energética e uma alta proporção de matéria orgânica. Essa valorização dos resíduos contribui para a sustentabilidade, ao oferecer uma solução para o tratamento de sólidos e reduzir a quantidade de resíduos enviados para aterros.

Além disso, Oliveira et al. (2020) investigaram o pré-tratamento dos caroços de açaí com uma solução de peróxido de hidrogênio para a produção de açúcares fermentáveis e etanol. Seus resultados mostraram que, após o pré-tratamento, os caroços apresentaram uma alta taxa de conversão em glicose e etanol. Isso sublinha a importância do aproveitamento desses resíduos para a produção de biocombustíveis, oferecendo uma alternativa sustentável para a gestão de resíduos e contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis.

Portanto, a reutilização dos caroços de açaí não apenas ajuda a minimizar os impactos ambientais associados ao seu descarte inadequado, mas também promove a sustentabilidade ao transformar resíduos em recursos valiosos, como biocarvão e bio-óleo, contribuindo assim para a preservação ambiental e a redução das mudanças climáticas.

### 3.3. Geração e reutilização de resíduos do açaí

O açaí (*Euterpe oleracea*) passa por um processo que separa a polpa das sementes. Durante esse processo, quando a polpa e a casca do açaí são misturadas com água morna, forma-se um suco espesso e roxo. Este procedimento também gera um resíduo significativo, que consiste nas sementes do açaí. Estas sementes são um resíduo valioso, contendo lignina e celulose, que possuem potencial para ser transformado em energia e combustível, tanto na forma sólida quanto líquida. A lignina e a celulose são componentes essenciais da biomassa lignocelulósica, amplamente estudada por suas aplicações na produção de bioenergia.

Durante a safra de 2016-2017, o Brasil produziu entre 1.200 e 1.274 milhões de toneladas de frutos de açaí, com o estado do Pará liderando a produção com 94% do total. Esse volume de produção resulta em uma quantidade considerável de resíduos sólidos, principalmente na forma de sementes e fibras ( De Castro et al., 2019; Valois et al., 2023). A gestão eficiente desses resíduos é crucial devido à grande quantidade gerada, que pode impactar o meio ambiente se não for adequadamente tratada.

A geração de resíduos, especificamente sementes cobertas com fibras, é diretamente proporcional ao aumento da produção de açaí. Considerando que 68% de todo o açaí produzido é descartado na forma de fibras e sementes, explorar novas aplicações para esses resíduos torna-se uma prioridade. Além dos benefícios ecológicos, como a redução do impacto ambiental, há uma necessidade urgente de encontrar usos sustentáveis para esses resíduos, que atualmente têm poucas aplicações técnicas (Tavares, 2020; Valois et al., 2023).

Na região amazônica, a agroindústria do açaí é responsável por 93% da produção extrativista vegetal não madeireira do Brasil. Os estados do Pará e do Amazonas são os principais produtores, com o Pará contribuindo com 50% e o Amazonas com 33,6% da produção nacional. Em 2017, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) estimou que cerca de 220 mil toneladas de açaí foram produzidas. Após a remoção da polpa para a produção de suco, aproximadamente 176 mil toneladas de resíduos foram descartadas, já que 80% do fruto é composto de fibras e caroço. A figura 2 mostra como os resíduos das sementes são descartados nas cidades como Belém do Pará. (De Sousa et al., 2010; Barbosa et al., 2019).

O desafio de gerenciar e destinar esses resíduos é considerável, especialmente diante do crescimento populacional e do aumento contínuo na geração de resíduos. Esse problema não só causa impactos sociais, como também apresenta sérios desafios ambientais. A biomassa lignino-celulósica, como a resultante das sementes de açaí, é uma categoria de resíduo que merece atenção devido ao seu alto volume e características físico-químicas.(Valois et al., 2023; Valdez et al., 2021). A valorização desses resíduos pode contribuir para a produção sustentável de energia e reduzir a pressão sobre os sistemas de gestão de resíduos (Rogez & Pompeu, 2009; Sato et al., 2018; Barbosa et al., 2019; Tavares et al., 2020; Valois et al., 2023).

O açaí, uma palmeira nativa da região amazônica do Brasil, cresce abundantemente nas várzeas da Amazônia, onde seu cultivo é uma importante atividade econômica. Seus frutos são valiosos tanto para a agroindústria quanto para as atividades extrativistas realizadas por comunidades rurais no estado do Pará. Essa importância econômica reforça a necessidade de uma gestão eficiente dos resíduos gerados, aproveitando-os para promover práticas sustentáveis e inovadoras na produção de bioenergia e outros produtos de valor agregado (Rogez & Pompeu, 2009; Barbosa et al., 2019; Tavares et al., 2020; Valois et al., 2023).

**Figura 2.** Descarte inadequado de resíduos de biomassa de frutos de açaí em Belém do Pará.



**Fonte:** Extraído de Sato et al., (2018).

Neste cenário, a demanda por materiais sustentáveis tem aumentado significativamente, impulsionada pela necessidade de incorporar matérias-primas provenientes de fontes renováveis. Essa tendência visa não apenas minimizar o impacto ambiental, mas também reduzir os custos associados à produção e ao descarte de materiais. A utilização de recursos renováveis permite uma abordagem mais ecológica e econômica, promovendo a sustentabilidade e contribuindo para a preservação dos recursos naturais (Lahr & Junior, 2015; Barbosa et al., 2019; Valois et al., 2023).

### 3.3.1. BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA DA SEMENTE DO AÇAÍ

A biomassa, segundo a literatura, refere-se a toda matéria orgânica derivada, direta ou indiretamente, do processo de fotossíntese. Essa definição engloba uma ampla gama de fontes, incluindo florestas, culturas agrícolas, resíduos agrícolas e rejeitos provenientes tanto de processos industriais quanto urbanos (Cidreira, 2019). De acordo com a classificação comum, a biomassa pode ser dividida em quatro categorias principais, baseadas em sua origem: biomassa da madeira, biomassa herbácea, biomassa aquática e biomassa derivada de resíduos animais e humanos. Além disso, é possível encontrar misturas de diferentes tipos de biomassa (Tursi, 2019; Cidreira, 2019).

Dentro desse espectro, a biomassa lignocelulósica se destaca devido à sua composição estrutural particular. Ela é caracterizada pela presença predominante de três carboidratos poliméricos: celulose, hemicelulose e lignina. Esses componentes são essenciais para a estrutura e funcionalidade das paredes celulares das plantas. A celulose, como o principal componente estrutural, fornece rigidez e resistência à biomassa, enquanto a hemicelulose e a lignina têm papéis complementares que afetam a integridade estrutural e as propriedades mecânicas do material (Zhou et al., 2011; Cidreira et al., 2019).

A celulose é uma molécula de polissacarídeo linear composta por unidades repetitivas de glicose, ligadas por ligações  $\beta$ -1,4-glicosídicas. Essa estrutura linear permite a formação de microfibras altamente organizadas e alinhadas, conferindo à celulose uma alta resistência à tração e estabilidade estrutural. A quantidade de celulose na biomassa é um fator determinante das propriedades mecânicas do

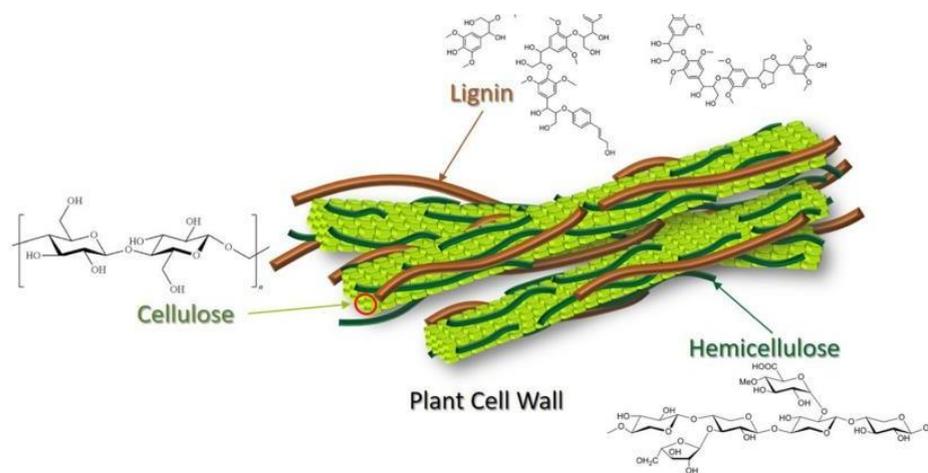
material. A resistência à tração e a rigidez da biomassa são diretamente proporcionais ao conteúdo de celulose presente (Khalil et al., 2014; Jensen et al., 2017).

A hemicelulose, por outro lado, é um polissacarídeo ramificado e heterogêneo, composto por várias unidades de monossacarídeos diferentes, como xilose, arabinose e manose. Diferente da celulose, a hemicelulose possui uma estrutura menos ordenada e é solúvel em soluções alcalinas. Ela forma uma rede que envolve as microfibras de celulose, agindo como um compatibilizante natural que ajuda a manter a integridade da estrutura da parede celular e facilita a interação entre celulose e lignina (Cidreira et al., 2019; Jensen et al., 2017).

A lignina é um polímero amorfo e complexo, com características tanto hidrofóbicas quanto hidrofílicas, que proporciona uma série de funções cruciais para a biomassa. Ela preenche os espaços entre as fibras de celulose e hemicelulose, formando uma rede tridimensional que confere rigidez adicional e resistência ao ataque de organismos patogênicos e à degradação química. A lignina também desempenha um papel na retenção de água dentro das células vegetais, ajudando a manter a turgidez das células e a resistência ao estresse ambiental (Majeed et al., 2013; Cidreira et al., 2019; Jensen et al., 2017).

A estrutura tridimensional da matriz lignocelulósica varia amplamente dependendo da origem da biomassa e das condições ambientais em que a planta cresce. A organização dos polímeros de celulose, hemicelulose e lignina pode resultar em diferentes propriedades físicas e químicas, influenciando o comportamento da biomassa durante processos industriais como a conversão em bioenergia ou a fabricação de materiais compostos. A Figura 3 ilustra a disposição desses componentes na parede celular das plantas, destacando a complexidade e a variabilidade da estrutura lignocelulósica.

**Figura 3.** Estrutura da biomassa lignocelulósica



**Fonte:** Extraído de Jensen et al., 2017.

Diversos autores têm explorado a biomassa lignocelulósica com o objetivo de aproveitar uma fonte renovável e de baixo custo para produzir materiais de maior valor agregado. Esse enfoque busca não apenas melhorar a qualidade de vida da população, mas também reduzir a geração de resíduos nocivos ao meio ambiente. Conforme discutido no tópico 3.3, as sementes de açaí, compostas predominantemente por biomassa lignocelulósica, representam um resíduo de significativa relevância. Elas oferecem potencial para a produção de diversos produtos industriais e farmacêuticos, aproveitando suas propriedades biológicas para desenvolver aplicações inovadoras e sustentáveis.(Cidreira et al., 2019).

### 3.4. Processos de conversão de biomassa

A conversão da biomassa em combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos é essencial para transformar recursos renováveis em formas de energia utilizáveis. Esse processo é crucial para diversificar as fontes de energia, reduzir a dependência de combustíveis fósseis e oferecer soluções sustentáveis para a gestão de resíduos. A biomassa pode ser convertida por meio de processos termoquímicos, bioquímicos e mecânicos, cada um com suas características e aplicações específicas.(Bridgwater et al., 2012).

Os processos termoquímicos envolvem a transformação da biomassa por meio de reações químicas induzidas pelo calor. A combustão é um dos métodos mais diretos e amplamente utilizados, onde a biomassa é queimada na presença de oxigênio para gerar calor. Esse calor pode ser usado para produzir eletricidade em usinas termelétricas ou para aquecimento direto. A eficiência da combustão é influenciada por variáveis como a umidade da biomassa e a temperatura do processo. A gaseificação, por sua vez, converte a biomassa em um gás de síntese, ou "syngas", composto principalmente por monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H<sub>2</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). (Almeida et al., 2008; Bridgwater et al., 2012).

Esse processo ocorre a altas temperaturas em um ambiente de baixo oxigênio, e o syngas pode ser utilizado para gerar eletricidade, produzir calor ou como matéria-prima para produtos químicos e combustíveis líquidos. A pirólise é a decomposição térmica da biomassa na ausência de oxigênio, resultando na formação de bio-óleo, carvão vegetal e gases. O bio-óleo pode ser refinado e utilizado como combustível líquido, enquanto o carvão vegetal pode ser empregado como agente redutor em processos industriais. A pirólise permite a conversão da biomassa em produtos de maior densidade energética. A liquefação, por sua vez, transforma a biomassa em líquidos combustíveis por meio de temperaturas e pressões elevadas, frequentemente na presença de um catalisador. Esses líquidos, conhecidos como bio-óleos, podem ser usados como substitutos do petróleo em processos industriais e como combustíveis em motores de combustão interna. (Bridgwater et al., 2012).

Os processos bioquímicos utilizam organismos vivos ou enzimas para converter a biomassa em produtos de valor agregado, geralmente operando a temperaturas mais baixas e com maior seletividade. A fermentação é um processo que transforma açúcares presentes na biomassa em etanol, um biocombustível líquido, por meio da ação de microrganismos como leveduras. A fermentação é amplamente utilizada na produção de biocombustíveis de primeira geração e pode ser realizada em sistemas contínuos ou em batelada. O etanol obtido pode ser usado como aditivo para gasolina ou como combustível puro em veículos adaptados. A digestão anaeróbica é um processo biológico que ocorre na ausência de oxigênio e envolve a decomposição da matéria orgânica por microrganismos para produzir biogás, uma mistura de metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). O biogás pode ser utilizado para gerar eletricidade

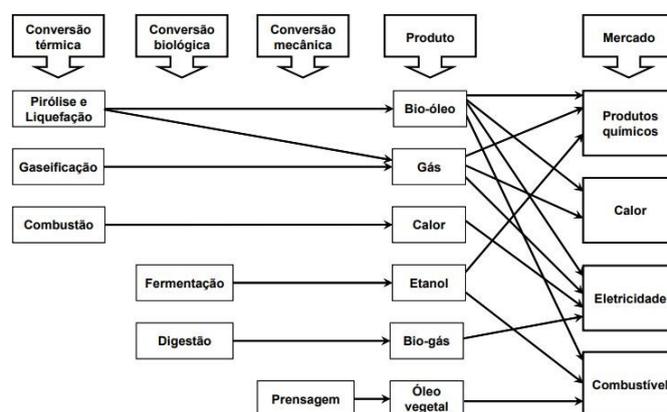
e calor, enquanto a digestão restante pode ser utilizada como fertilizante.(Almeida et al., 2008; Bridgwater et al., 2012).

Os processos mecânicos, por outro lado, não alteram o estado químico da biomassa, mas são essenciais para a preparação e o tratamento físico do material, o que pode influenciar a eficiência dos processos subsequentes. A compactação transforma resíduos de biomassa em pellets ou briquetes, aumentando a densidade energética e facilitando o armazenamento e transporte. Esses produtos são frequentemente utilizados em sistemas de aquecimento residencial e em usinas de biomassa. A moagem e a picagem reduzem o tamanho das partículas da biomassa, facilitando a manipulação e melhorando a eficiência em processos de combustão e conversão. A biomassa moída ou picada pode ser utilizada como combustível em caldeiras e fornos. A extração mecânica de óleos vegetais é realizada por métodos como a prensa de filtro, onde a biomassa é prensada para extrair óleos que podem ser usados como biocombustíveis ou em produtos industriais.

Dos processos de conversão apresentados na Figura 4, a pirólise é especialmente adequada para a produção de bio-óleo nas indústrias. A pirólise é um processo de decomposição térmica que ocorre na ausência de oxigênio e constitui a etapa inicial dos processos de combustão e gaseificação.(Bridgwater et al., 2012). Durante a pirólise da biomassa, são gerados três produtos principais: gás, líquido e sólido. O gás é composto por monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarbonetos leves. O líquido, de coloração escura, é conhecido como bio-óleo, enquanto o sólido resultante é o carvão vegetal.

A qualidade e o rendimento dos produtos obtidos na pirólise são fortemente influenciados pelas condições operacionais empregadas. Dependendo dessas condições, a pirólise pode receber diferentes denominações. Na pirólise lenta, também chamada de carbonização, utilizam-se baixas temperaturas e longos tempos de residência, o que favorece a produção de carvão vegetal. Em contraste, temperaturas elevadas e longos tempos de residência promovem a formação de gases. Já temperaturas moderadas e tempos de residência mais curtos resultam na produção predominante de líquidos, ou bio-óleos. A Tabela 1 apresenta exemplos dos perfis de rendimento dos produtos em função das diferentes condições de processo de pirólise (Bridgwater et al., 2012; Almeida et al., 2008).

**Figura 4.** Processos de conversão de biomassa, produtos e aplicações



**Fonte:** Adaptado de Bridgwater et al, (2012)

**Tabela 1.** Rendimentos típicos obtidos para diversos tipos de pirólise

Processo	Condições operacionais	Líquido	Sólido	Gás
		(%p/p)	(%p/p)	(%p/p)
Pirólise lenta (Carbonização)	Temperatura baixa ~ 400°C Tempo de residência - horas/dias	30	35	35
Pirólise rápida	Temperatura moderada ~ 500°C Tempo de residência dos vapores baixo ~ 1s	75	12	13
Pirólise tipo Gaseificação	Temperatura elevada ~ 800°C Tempo de residência dos vapores longo	5	10	85

**Fonte:** Adaptado de Bridgwater et al, (2012)

A literatura indica que, durante a pirólise, ocorrem reações químicas primárias e secundárias. As reações primárias afetam diretamente o substrato celulósico, enquanto as reações secundárias ocorrem na decomposição dos produtos intermediários, como vapores orgânicos e levoglucosan (Luengo et al., 2008; Mota et al., 2015). Em processos com baixa taxa de aquecimento e longos tempos de residência, as reações secundárias são mais prevalentes, ao contrário dos processos de pirólise rápida, onde altas taxas de aquecimento e tempos curtos de residência favorecem menos as reações secundárias (Mota et al., 2015). As reações primárias são cruciais para a produção de líquidos, enquanto as secundárias contribuem para a



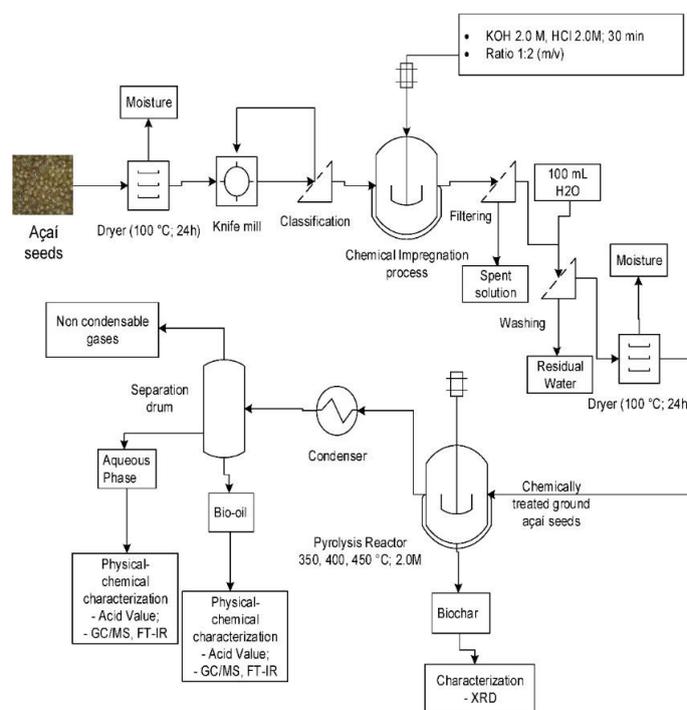
eficiência e as características desses produtos são influenciadas por diversos fatores, incluindo a natureza da biomassa, o tipo de pirólise (como térmica, instantânea ou a vácuo), o tipo de reator (como tubo, leito fixo ou leito fluidizado), o modo de operação (batelada, semicontínuo ou contínuo) e os parâmetros do processo (temperatura, tipo de catalisador, relação catalisador/biomassa, taxa de fluxo de gás, peso hora e velocidade espacial) (Bufalino et al., 2018; De Castro et al., 2019; Guerreiro et al., 2022; Valois et al., 2023).

A pirólise das sementes de açaí (*Euterpe oleracea*, Mart.), que são ricas em material lignocelulósico, oferece a possibilidade de produzir bio-óleos líquidos, combustíveis gasosos e biochar sólido. Apesar de vários estudos anteriores terem investigado a pirólise de biomassa e as propriedades físico-químicas do bio-óleo, ainda não há uma análise sistemática sobre como a temperatura de pirólise afeta o rendimento dos produtos e as propriedades físico-químicas (como densidade, viscosidade cinemática, índice de acidez e índice de refração) das sementes de açaí (Das & Ganesh, 2003; Apaydin & Putun, 2004; Zhang et al., 2007; Tsai, Lee & Shang, 2007; Kumar, Panda & Singh, 2010; Heo et al., 2010; Sun et al., 2014; Sharma & Sheth, 2015; Serrão et al., 2021; Valois et al., 2023).

Embora existam pesquisas sobre a pirólise de sementes residuais de açaí, a maioria focou na produção de carvão ativado e bioadsorventes. Esses estudos utilizaram sementes em seu estado natural ou aplicaram ativação química com NaOH, KOH, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, ou ativação física com CO<sub>2</sub>. No entanto, faltam estudos que analisem simultaneamente os efeitos da temperatura e da ativação alcalina sobre o rendimento, a composição química, a acidez e a atividade antioxidante do bio-óleo, bem como sobre a composição e acidez da fase aquosa (Valois et al., 2023). Investigar essas variáveis, como a temperatura e a concentração de HCl e KOH para o tratamento químico, é crucial para compreender os mecanismos do processo e projetar uma abordagem mais eficaz. Devido à complexidade e à variedade de condições possíveis, informações técnicas sobre diferentes matérias-primas, reatores e condições de pirólise são essenciais para a otimização do processo (Bufalino et al., 2018; De Castro et al., 2019; Sato et al., 2019; Pessoa et al., 2019; Castro et al., 2021; Nascimento et al., 2021; Valdez et al., 2023; Valois et al., 2023).

Sob essa ótica, a produção de bio-óleo a partir de sementes de açaí por pirólise é realizada de forma metódica, utilizando um reator de laboratório tipo leito fixo. O processo inicia-se com a coleta das sementes de açaí de produtores locais. Em seguida, as sementes passam por um processo de secagem, moagem e peneiramento. A biomassa em pó obtida é então sujeita a ativação química com HCl e KOH, sendo posteriormente lavada com água e seca novamente. Os experimentos de pirólise são conduzidos em um reator conectado a um condensador e a um funil de separação, sem a adição de catalisador, para avaliar o efeito da ativação alcalina, conforme ilustrado na Figura 6 (Valois et al., 2023).

**Figura 6.** . Esquema do fluxo do processo de produção de bio-óleo por pirólise de sementes de Açaí a 350, 400 e 450 156°C, 1,0 atm., 2,0 M de KOH e HCL 450 °C, 1,0 atm., 0,5 M, 1,0 M e 2,0 M de KOH, usando um reator de leito fixo em escala de laboratório.



**Fonte:** Extraído de Valois et al., (2023)

### 3.5.1. EFEITO DA TEMPERATURA NO PROCESSO

Como mencionado anteriormente, a pirólise é um processo termoquímico que envolve a decomposição térmica de materiais orgânicos na ausência ou em quantidades limitadas de oxigênio (Bridgwater et al., 2012). A temperatura é um fator crítico que afeta diretamente este processo, sendo essencial para determinar a taxa

de decomposição dos materiais orgânicos. Em geral, quanto maior a temperatura, mais rápida é a decomposição, resultando em uma maior produção de produtos pirolíticos, como gases, líquidos e carvão (De Castro et al., 2019).

Além disso, a temperatura influencia a distribuição e a composição dos produtos pirolíticos. A temperaturas mais baixas, tende-se a formar mais carvão sólido (carvão vegetal), enquanto temperaturas mais elevadas favorecem a produção de gases e líquidos pirolíticos (Valois et al., 2023). A qualidade dos produtos pirolíticos, incluindo a composição dos gases e a pureza do carvão produzido, está diretamente relacionada à temperatura de pirólise. Portanto, o controle da temperatura é crucial para otimizar a produção de um produto específico desejado (Valdez et al., 2021).

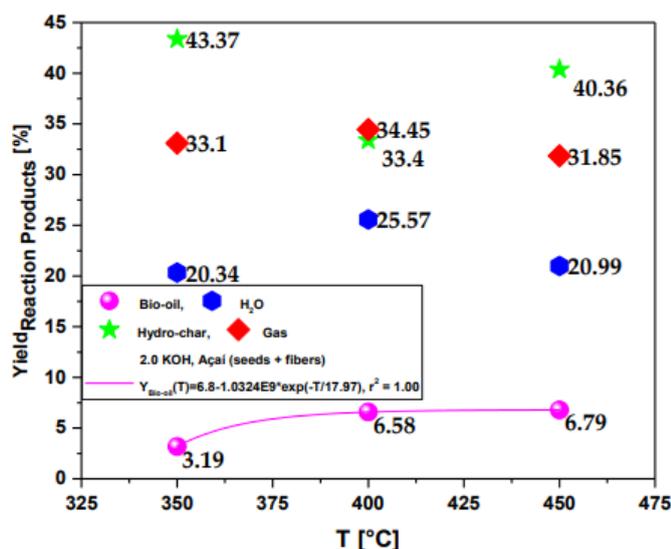
A eficiência energética do processo de pirólise também é impactada pela temperatura. Temperaturas mais altas podem exigir mais energia para aquecer o material, mas podem resultar em uma produção mais eficiente de energia a partir dos produtos pirolíticos (Bridgwater et al., 2012). Um controle preciso da temperatura é essencial para garantir que as reações químicas ocorram de maneira ideal e evitar reações indesejadas, como a combustão completa dos materiais, que ocorre na presença de oxigênio (Valois et al., 2023).

Em resumo, a temperatura desempenha um papel fundamental no processo de pirólise, influenciando a taxa e a qualidade dos produtos pirolíticos, bem como a eficiência geral do processo. Compreender e controlar cuidadosamente a temperatura é vital para maximizar os benefícios da pirólise em diversas aplicações industriais, como na produção de biochar, reciclagem de resíduos orgânicos e produção de biocombustíveis (De Castro et al., 2019).

No contexto da pirólise de biomassa residual de sementes de açaí realizada a 350, 400 e 450 °C, sob pressão de 1,0 atm e com ativação das sementes com solução de KOH 2,0 M, estudos indicam que o rendimento de bio-óleo aumenta gradualmente com a temperatura (Valois et al., 2023). Esses resultados corroboram observações anteriores que demonstraram um aumento no rendimento de bio-óleo com o aumento da temperatura em escala piloto (Serrão et al., 2021). Estudos similares também relataram um aumento consistente no rendimento de bio-óleo na faixa de temperatura entre 200 e 450 °C (Das & Ganesh, 2003; Asadullah et al., 2007; Ji Lu, 2007; Sukiran

et al., 2009; Varma & Mondal, 2017). A Figura 7 ilustra o efeito da temperatura no rendimento de bio-óleo obtido a partir dos resíduos de sementes de açaí.

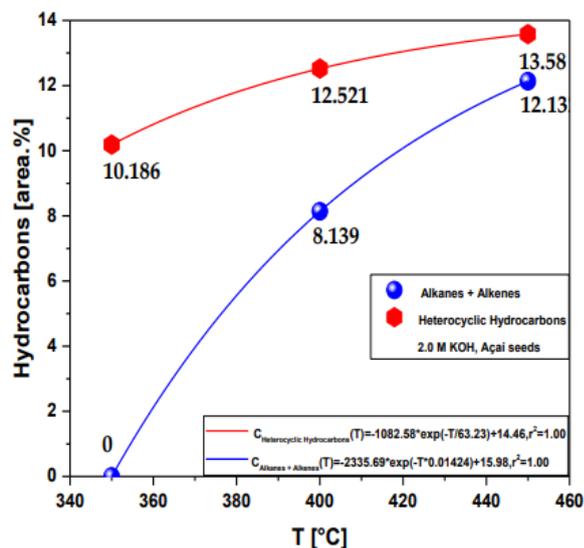
**Figura 7.** Rendimento dos produtos da reação (bio-óleo, H<sub>2</sub>O, biocarvão, gás) por pirólise das sementes de açaí (*Euterpe oleracea*, Mart) na faixa de temperatura de 350-450 °C.



Fonte: Extraído de Valois et al., (2023).

A literatura mostra que a concentração de hidrocarbonetos saturados e insaturados acíclicos, bem como de hidrocarbonetos heterocíclicos, no bio-óleo proveniente da pirólise de sementes de açaí ativadas, aumenta com a elevação da temperatura do processo. Estudos demonstraram que, a temperaturas de 350, 400 e 450 °C, e sob pressão de 1,0 atm, a concentração de hidrocarbonetos no bio-óleo aumenta, enquanto a de compostos oxigenados diminui com o aumento da temperatura. Além disso, observou-se um aumento nas concentrações de alcanos, alquenos e compostos aromáticos com o incremento da temperatura de pirólise. Esses resultados indicam que temperaturas mais elevadas favorecem a formação de hidrocarbonetos, como evidenciado na Figura 8 (Valois et al., 2023; Souza et al., 2021).

**Figura 8.** Concentração de hidrocarbonetos acíclicos saturados/insaturados (alcanos + alquenos) e 419 hidrocarbonetos heterocíclicos (cicloalcanos + cicloalquenos + aromáticos) no bio-óleo obtido por pirólise de sementes de Açaí (*Euterpe oleracea*, Mart) na faixa de temperatura de 350-450 °C.

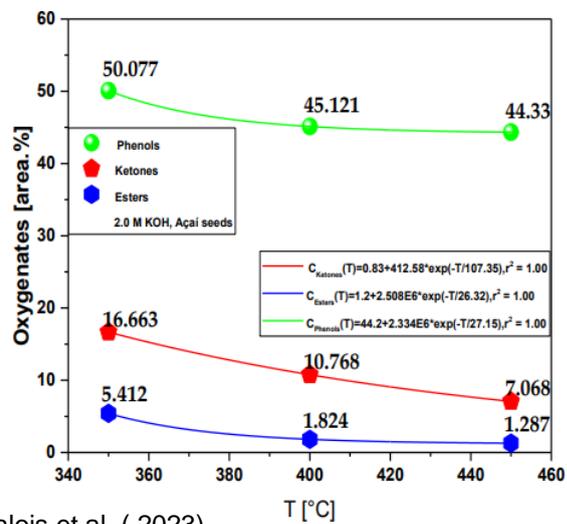


Fonte: Extraído de Valois et al., (2023).

Em relação aos compostos oxigenados formados durante a pirólise de biomassa lignocelulósica, a literatura aponta que, com o aumento da temperatura de pirólise, há uma diminuição nas concentrações de fenóis, ésteres e cetonas, conforme ilustrado na Figura 9 (Sousa et al., 2021). Estudos demonstram que cresóis, fenóis e cetonas tendem a diminuir com o incremento da temperatura de pirólise devido a reações de desoxigenação, que convertem esses compostos em hidrocarbonetos, monóxido de carbono, dióxido de carbono e água, através de processos como decarboxilação e decarbilização (Valois et al., 2023).

Embora o mecanismo exato dessas reações de desoxigenação não seja completamente compreendido, evidências sugerem que sua taxa aumenta com a temperatura de reação. Por exemplo, o ácido adípico, um ácido dicarboxílico, pode ser convertido em ciclo-pentanona por essas reações. Em temperaturas mais elevadas, também é possível a formação significativa de ciclo-penteno (Bernar et al., 2022; Ferreira et al., 2022).

**Figura 9.** A concentração de oxigenados (fenóis, cetonas e ésteres) no bio-óleo obtido pela pirólise de sementes de açaí (*Euterpe oleracea*, Mart) variou na faixa de temperatura de 350-450 °C



Fonte: Extraído de Valois et al., (2023).

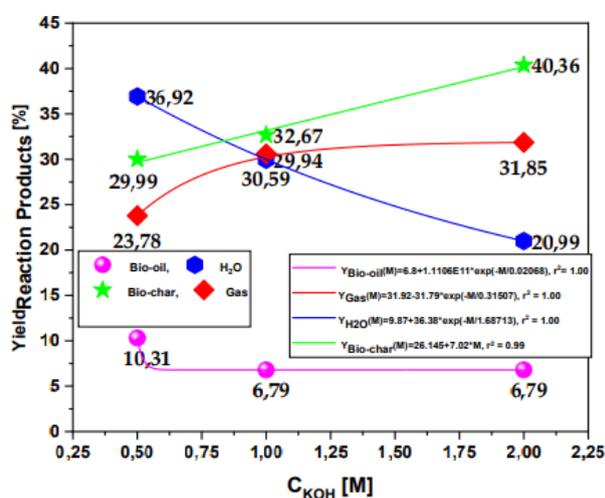
### 3.5.2. EFEITO DA MOLARIDADE NO PROCESSO

A impregnação química prévia da biomassa pode modificar de forma significativa suas propriedades físicas e químicas, impactando diretamente o rendimento e a qualidade dos produtos obtidos na pirólise (De Castro et al., 2019). Esse tratamento tem várias aplicações e benefícios. Primeiramente, a impregnação pode melhorar a estabilidade térmica da biomassa, permitindo que suporte temperaturas mais elevadas durante a pirólise sem sofrer degradação significativa. Além disso, alguns agentes de impregnação funcionam como catalisadores ou promotores de reação, facilitando a quebra das ligações químicas na biomassa e acelerando as reações de pirólise (Valdez et al., 2021). Isso não apenas aumenta a eficiência do processo, mas também pode alterar a composição dos produtos finais, promovendo a formação de compostos desejáveis, como hidrocarbonetos leves no bio-óleo (Leão et al., 2012; De Castro et al., 2019).

Outro benefício importante da impregnação química é a redução da formação de subprodutos indesejáveis, como alcatrão e gases não condensáveis, que podem comprometer a qualidade do bio-óleo. Agentes de impregnação específicos podem minimizar reações secundárias indesejáveis durante a pirólise, favorecendo a formação de produtos mais valiosos e reduzindo perdas de energia (Wang et al., 2015; De Castro et al., 2019).

Estudos indicam que a ativação química da biomassa pode aumentar o rendimento de bio-óleo e promover a quebra de moléculas de cadeia longa em moléculas menores de gás (Wang et al., 2015). Esse efeito é atribuído à presença de sais alcalinos e alcalino-terrosos, que atuam como catalisadores na quebra molecular. A produção de biocarvão aumenta linearmente com a concentração da solução de impregnação, enquanto a produção de gás cresce exponencialmente, indicando que concentrações mais elevadas favorecem a produção de gás, como demonstrado na Figura 10. (Valois et al., 2023).

**Figura 10.** Rendimento dos produtos da reação (bio-óleo, H<sub>2</sub>O, biocarvão, gás) por pirólise de sementes de Açai (Euterpe oleracea, Mart), a 450 °C, 1,0 atmosfera, ativadas com KOH 0,5 M, 1,0 M e 2,0 M, em escala laboratorial.



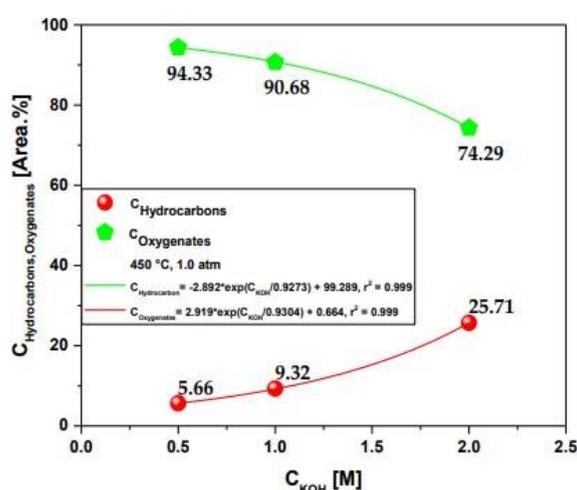
**Fonte:** Extraído de Valois et al., (2023).

Os estudos indicam que os rendimentos de bio-óleo tendem a aumentar até atingir um platô próximo a 1,0 M. Análises físico-químicas mostram que a acidez do bio-óleo é significativamente reduzida ao utilizar concentrações de 2,0 M ou superiores. Isso sugere que o mecanismo de pré-tratamento básico na pirólise da biomassa promove uma desoxigenação adicional do bio-óleo, com a retenção dos compostos oxigenados nas fases aquosa e de biocarvão (De Castro et al., 2019).

Quanto ao impacto da molaridade na composição química do bio-óleo, observa-se que as concentrações de hidrocarbonetos, incluindo alcanos, alcenos, aromáticos e hidrocarbonetos cíclicos, aumentam com a molaridade. Por outro lado, as concentrações de compostos oxigenados, como álcoois, aminas, ácidos carboxílicos, fenóis, cetonas, furanos e outros, diminuem conforme a molaridade aumenta. Estudos

mostram que, na pirólise de sementes de açaí a 450 °C e 1,0 atmosfera, utilizando soluções de NaOH com concentrações de 0,5 M, 1,0 M e 2,0 M, maiores molaridades de NaOH favorecem a formação de hidrocarbonetos (De Castro et al., 2019; Valois et al., 2023). A Figura 11 ilustra o efeito de diferentes molaridades da solução de KOH na concentração de hidrocarbonetos e compostos oxigenados no bio-óleo produzido pela pirólise de sementes de açaí.

**Figura 11.** Concentrações de hidrocarbonetos e oxigenados em bio-óleo obtido por pirólise de açaí (*Euterpe oleracea*, Mart) a 450 °C, atmosfera 1,0 e usando diferentes concentrações de KOH (0.5 M-2.0M) em escala laboratorial.



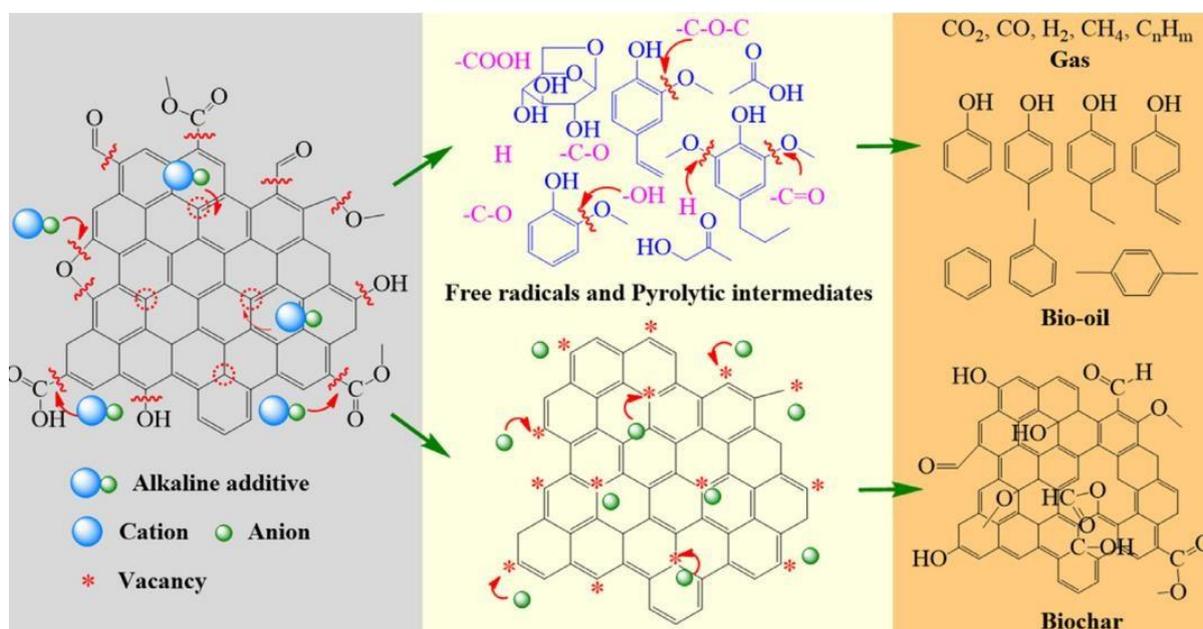
Fonte: Extraído de Valois et al., (2023).

Segundo o estudo de Chen et al., (2020), o possível caminho da reação química entre biomassa e aditivos alcalinos durante o processo de pirólise é mostrado na Fig. 12. Durante a pirólise da biomassa, a adição de aditivos alcalinos pode levar esses aditivos a reagirem com espécies ativas contendo oxigênio presentes na biomassa. Esse processo remove os grupos contendo oxigênio, liberando radicais livres de pequenas moléculas e gerando grandes quantidades de vacâncias. Os aditivos também podem corroer os fragmentos de carbono para formar vacâncias, o que é acompanhado pela geração de prótons de hidrogênio. Subsequentemente, alguns ânions dos aditivos alcalinos ocupam rapidamente essas vacâncias, formando novos grupos contendo oxigênio no biochar, como -OH, -O-C=O e -COOH. Além disso, os aditivos alcalinos se convertem em estruturas mais estáveis, como K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, CaO e MgO. Esses processos fixam uma quantidade significativa de oxigênio no

biochar, aumentando assim o rendimento do biochar e promovendo a formação de uma estrutura porosa mais desenvolvida.(Chen et al., 2020).

Além disso, radicais livres como  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{C}=\text{O}$ ,  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ ,  $-\text{OH}$  e prótons de hidrogênio podem reagir com intermediários da pirólise, como ácido acético, hidroxiacetona, levoglucosan e fenóis metoxílicos. Isso resulta na formação de grandes quantidades de fenóis não-metoxílicos (como fenol, p-cresol, 4-etilfenol e 4-vinilfenol) e compostos aromáticos (como benzeno, tolueno e xileno). A liberação de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{CH}_4$  também ocorre durante esse processo, levando ao aumento do rendimento de gases e à diminuição do rendimento de bio-óleo.(Chen et al., 2020)

**Figura 12.** Possível caminho da reação química durante a pirólise da biomassa com aditivos alcalinos.



Fonte: Extraído de Chen et al.,( 2020).

### 3.6. Bio-óleos

Na literatura, há uma série de estudos que caracterizam o bio-óleo como uma mistura complexa de água e matéria orgânica. Os bioóleos contêm uma ampla gama de produtos químicos orgânicos, incluindo produtos bioquímicos valiosos, como o levoglucosano (Kim et al., 2015; De Castro et al., 2019). Isso indica o potencial para a extração e uso de diversos produtos químicos dos bio-óleos como matérias-primas renováveis para uma ampla gama de indústrias químicas. As quantidades dos vários

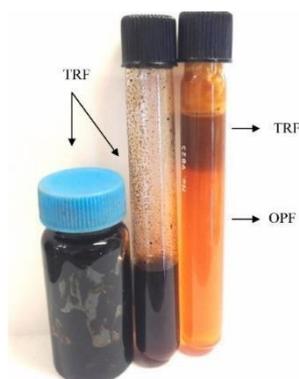
componentes do bio-óleo dependem fortemente da composição da matéria-prima, do método de produção e das condições de reação (Kim et al., 2015).

O componente mais abundante no bio-óleo é a água, que representa de 10% a 30% do peso. A água resulta da umidade original da biomassa e das reações de desidratação durante a pirólise. Sua presença tem efeitos tanto positivos quanto negativos sobre as propriedades do bio-óleo. Por um lado, a água melhora a fluidez do produto, diminuindo sua viscosidade. Por outro lado, reduz o poder calorífico, aumenta o atraso na ignição e, em alguns casos, diminui a taxa de combustão. Devido ao seu alto teor de água, o bio-óleo pode ser considerado uma microemulsão, onde a fase contínua é uma solução aquosa dos produtos da decomposição da holocelulose (celulose e hemicelulose) que estabiliza a fase dispersa de lignina pirolisada por meio de mecanismos como ligações de hidrogênio (Machado et al., 2013; Kim et al., 2015; De Castro et al., 2019).

O bio-óleo apresenta instabilidade química devido à presença de compostos orgânicos reativos, que afetam diretamente a viscosidade, o poder calorífico e a densidade. Supõe-se que as ligações duplas presentes em muitos dos compostos do bio-óleo sejam ativas na polimerização na presença de oxigênio. Além disso, cetonas, aldeídos e ácidos orgânicos podem reagir para formar éteres, acetais e hemiacetais, o que resulta em um aumento da massa molecular média, da viscosidade e do teor de água do bio-óleo. Assim, a qualidade do bio-óleo pode ser prejudicada pelo tempo de armazenamento, levando a uma eventual separação de fases e degradação química (De Castro et al., 2019).

Os Bio-óleos produzidos pela pirólise de biomassa lignocelulósica contêm mais de 400 compostos químicos diferentes. Esses compostos podem ser classificados em categorias primárias, como ácidos orgânicos, aldeídos, cetonas, furanos, componentes à base de açúcar e compostos fenólicos. A diversidade e complexidade dos bioóleos tornam a análise precisa de sua composição química uma tarefa bastante complicada (Kim et al., 2015). A Figura 13 ilustra o aspecto físico do bio-óleo gerado pelo processo de pirólise de biomassa lignocelulósica.

**Figura 13.** Bio-óleo extraído de biomassa lignocelulósica.



**Fonte:** Extraído de Scheibe et al., (2022).

A análise de bio-óleo geralmente emprega técnicas como cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa (GC-MS), detector de ionização de chama acoplado à cromatografia gasosa (GC-FID), cromatografia líquida de alto desempenho (HPLC), cromatografia de troca iônica e/ou espectroscopia de ressonância magnética nuclear (RMN). Entre essas técnicas, as metodologias acopladas, como o GC-MS, são particularmente eficazes para a análise de misturas complexas. No entanto, a análise convencional de bio-óleos por GC-MS pode fornecer informações químicas limitadas devido ao grande número de compostos presentes e à ocorrência de coeluições (Machado et al., 2013; Kim et al., 2015).

### **3.7. Atividades biológicas de resíduos de biomassa de açaí**

#### **3.7.1. CAPACIDADE ANTIOXIDANTE DOS RESÍDUOS DE BIOMASSA**

O aumento da demanda por produtos naturais e funcionais tem estimulado o interesse por ingredientes derivados de fontes vegetais que são ricos em compostos bioativos. Estes componentes têm o potencial de promover significativamente a saúde e o bem-estar humano. Entre esses ingredientes, o óleo de açaí (*Euterpe oleracea*) e seus resíduos têm emergido como candidatos promissores devido às suas propriedades nutricionais e antioxidantes (Komaiko & McClements, 2016; Filho et al., 2023).

O açaí (*Euterpe oleracea*) é reconhecido como um alimento nutracêutico devido às suas propriedades nutritivas e terapêuticas, tornando-se objeto frequente de estudo devido ao seu valor nutritivo e sensorial, especialmente atribuído à sua ação

antioxidante. Este fruto é rico em compostos antioxidantes como flavonoides, antocianinas e compostos fenólicos, que desempenham um papel crucial na prevenção de doenças.( Santos et al., 2008; Menezes e Torres, 2008).

As antocianinas, em particular, são compostas hidrossolúveis responsáveis pela coloração vermelha escura característica do açaí. Além de sua função antioxidante, as antocianinas possuem propriedades anticarcinogênicas, anti-inflamatórias e antimicrobianas. Elas são conhecidas por prevenir a oxidação das lipoproteínas de baixa densidade (LDL), o que contribui para a redução do risco de doenças cardiovasculares e neurológicas. (Santos et al., 2008; Menezes e Torres, 2008; Velasque e Lobo, 2016).

A descoberta da significativa capacidade antioxidante na polpa do açaí elevou seu status para além de um simples alimento, sendo agora considerado um alimento altamente funcional quando comparado a outros. Recentemente, estudos também têm investigado a atividade antioxidante do caroço do fruto, embora a segurança toxicológica desta parte ainda necessite de confirmação por meio de mais pesquisas.(Cedrim et al., 2018).

Na literatura especializada, há um crescente interesse na avaliação da capacidade antioxidante de bio-óleos obtidos por pirólise de biomassa proveniente de diversos materiais, como madeira de bétula, casca de prata de café, pinho vermelho, borra de café colombiana, tabaco, tomate, pó de café, pinho vermelho japonês, bagaço de uva e outros tipos de madeira. Contudo, até o momento, apenas alguns estudos exploraram a influência da temperatura de pirólise na atividade antioxidante desses bio-óleos. Ainda mais escasso na literatura é o estudo simultâneo da influência da temperatura e da ativação química (molaridade) na capacidade antioxidante desses bio-óleos de pirólise (Rogez e Pompeu, 2009; Patra et al., 2015; Chandralekaram et al., 2016; Hossain et al., 2018; Del Pozo et al., 2020; Chen et al., 2021; Valois et al., 2023).

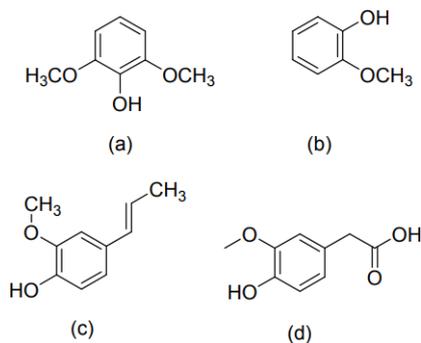
De acordo com estudos recentes, o bio-óleo é conhecido por conter mais de 300 compostos com diferentes pesos moleculares (MWs), principalmente produtos de degradação de três componentes principais da biomassa: polímeros de carboidratos como celulose e hemicelulose. A lignina, que possui um alto teor de oxigênio variando de 15% a 30% em peso, é caracterizada por alta acidez e baixa estabilidade à

oxidação. Embora o bio-óleo seja primariamente utilizado como fonte de energia alternativa, também se mostrou uma fonte valiosa de compostos antioxidantes, aditivos alimentares e agentes aromatizantes. (Mohan et al., 2006; Bedmutha, 2011; Zilnik e Jazbinsek, 2012).

Devido ao fato de as ligninas serem polifenóis, sua decomposição térmica durante a pirólise gera compostos fenólicos, que têm potencial para serem empregados como monômeros e antioxidantes. Estudos detalhados de pirólise a vácuo têm identificado a evolução de fenóis na faixa de temperatura entre 275° C e 350°C, com os fenóis subsequentemente convertidos em catecol por desmetilação de grupos dimetoxi a temperaturas entre 350°C e 450°C. Os rendimentos totais de fenólicos obtidos por métodos sequenciais e por pirólise em um único passo foram relatados como 4,43% e 2,51% em peso, respectivamente, com base no material de alimentação anidro (Elevasaran et al., 2010; Patra et al., 2015; Chandrasekaran et al., 2016).

No estudo conduzido por Patra et al (2015), a serragem de pinho vermelho japonês foi utilizada como matéria-prima para a produção de bio-óleo (SOB). Este estudo investigou a composição química dos compostos voláteis, a capacidade de eliminação de radicais livres e os potenciais antioxidantes do SOB derivado dessa serragem. Devido à complexidade dos diferentes tipos de antioxidantes e suas reatividades variadas, um único ensaio antioxidante pode oferecer apenas uma visão limitada das propriedades antioxidantes presentes em uma amostra. Portanto, diversos métodos *in vitro* foram aplicados neste estudo e em outros como de Chandrasekaran et al., 2016 para avaliar o potencial antioxidante do bio-óleo, revelando a presença de vários compostos antioxidantes, conforme ilustrado na Figura 14 (Ksouri et al., 2009; Patra et al., 2015; Chandrasekaran et al., 2016).

**Figura 14.** Estrutura química dos compostos fenólicos encontrados no bio-óleo de bétula de madeira: (a) syringol (b) guaiacol, (c) isoeugenol, (d) homovanillic acid



**Fonte:** Extraído de Chandrasekaran et al., 2016

O bio-óleo derivado do açaí tem sido objeto de estudos na literatura devido às propriedades físico-químicas do fruto e seus resíduos, que demonstram um forte poder antioxidante. Esses estudos indicam que o açaí pode ser considerado um alimento funcional devido aos seus compostos antioxidantes, que são capazes de inibir ou reduzir os efeitos causados pelos radicais livres. Os resíduos gerados pelo processamento do açaí, como as sementes e o bio-óleo, também têm sido explorados por seu potencial antioxidante. (Silva & Rogez, 2013; Valois et al., 2023).

Antioxidantes são substâncias que atuam protegendo contra o estresse oxidativo, o qual é desencadeado pelos radicais livres e outros compostos oxidantes. Eles desempenham um papel crucial na redução dos danos ao DNA e outras macromoléculas, ajudando a mitigar os efeitos cumulativos que podem levar ao desenvolvimento de doenças, ampliando as possibilidades de aplicação desses subprodutos como fontes naturais de antioxidantes em diferentes setores, como alimentício, cosmético e farmacêutico. (Cedrim et al., 2018; Silva & Rogez, 2013)

O açaí se destaca como uma das frutas com maior potencial antioxidante devido ao seu alto teor de polifenóis. Além de suas propriedades antioxidantes, o açaí também apresenta características anti-inflamatórias e farmacológicas que podem contribuir para a prevenção de doenças associadas ao estresse oxidativo causado pelos radicais livres (Pozo-Insfran et al., 2004; Rocha et al., 2015; Cedrim et al., 2018).

### 3.7.2. AÇÃO ANTIMICROBIANA E CITOTOXICIDADE DOS DERIVADOS DO AÇAÍ E SEUS RESÍDUOS

A polpa do açaí tem sido objeto de estudo devido ao seu alto valor nutritivo e suas qualidades sensoriais distintas. Este fruto é conhecido por ser rico em antocianinas, que são flavonoides responsáveis pela coloração avermelhada característica do açaí. As antocianinas não apenas conferem cor ao fruto, mas também possuem propriedades farmacológicas e medicinais bem documentadas. Entre os benefícios das antocianinas estão suas atividades antimicrobiana, anti-inflamatória e anticarcinogênica. Elas são reconhecidas por sua capacidade de proteger contra a oxidação das lipoproteínas de baixa densidade (LDL), contribuindo assim para a prevenção de doenças neurológicas e enfermidades cardiovasculares.(Filho e Pereira, 2012; Rogez et al., 2012).

Além das antocianinas, o açaí contém uma variedade de compostos bioativos como outros flavonoides não antocianinas, aminoácidos, ácidos graxos essenciais e minerais. Esses compostos possuem importantes propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias, que são fundamentais para a saúde humana, ajudando a reduzir o estresse oxidativo e a inflamação crônica, que estão associados ao desenvolvimento de diversas doenças. Assim, a pesquisa contínua sobre os compostos bioativos presentes no açaí não apenas amplia nosso entendimento sobre suas propriedades benéficas, mas também fortalece sua reputação como um alimento funcional e nutricionalmente valioso (Kuskoski et al., 2002; Alasalvar et al., 2005; Filho e Pereira, 2012; Rogez et al., 2012)

Estudos têm explorado a ação antimicrobiana de diversos produtos derivados do açaí, como o óleo, a polpa e o mel produzido a partir do néctar das flores do açaí, especialmente na região amazônica. Um exemplo é o estudo de Silva (2023), que destacou que compostos derivados do mel de abelha, que poliniza o fruto do açaí, possuem atividade antimicrobiana contra bactérias como *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Bacillus cereus* e *Salmonella sp.* O mel derivado do açaí, produzido no Pará, apresenta características composicionais e físico-químicas distintas em comparação a outros méis obtidos de néctar floral silvestre de diferentes regiões.

Essas diferenças podem influenciar suas propriedades antimicrobianas e outros potenciais benefícios para a saúde.( Silva et al., 2023).

Essas descobertas ressaltam não apenas a diversidade e complexidade dos compostos bioativos presentes no açaí e em seus produtos derivados, mas também seus potenciais aplicações na saúde, especialmente no controle de microrganismos patogênicos. Estudos adicionais são necessários para explorar completamente o potencial antimicrobiano desses produtos e entender melhor suas implicações para a saúde humana (Silva et al., 2023).

Além das propriedades antioxidantes e antimicrobianas dos produtos derivados do açaí, como o mel e outros, os próprios frutos de açaí são um interessante campo de estudo devido à presença de uma comunidade bacteriana diversificada. Estudos recentes, como o de Sato et al. (2021) e Silva et al. (2023), têm revelado que os frutos de açaí pós-colheita abrigam uma alta diversidade de bactérias mesófilas totais. Os filos bacterianos mais comumente encontrados incluem Proteobacteria, Firmicutes, Actinobacteria, Bacteroidetes e Acidobacteria, com a identificação de aproximadamente 200 gêneros bacterianos.(Sato et al., 2021; Silva et al., 2023).

Algumas dessas bactérias são potenciais candidatas a probióticos, o que significa que podem conferir benefícios à saúde quando consumidas em quantidades adequadas. Além disso, algumas cepas bacterianas presentes nos frutos de açaí mostraram potencial antagônico contra patógenos, o que pode ser explorado para o desenvolvimento de estratégias naturais de controle de doenças. Essas descobertas ampliam ainda mais o potencial nutricional e funcional dos frutos de açaí, destacando não apenas sua riqueza em compostos bioativos, mas também sua interação com microrganismos que podem influenciar positivamente a saúde humana. Mais pesquisas são necessárias para explorar o papel dessas bactérias na promoção da saúde através do consumo de açaí e seus produtos derivados.( Rogez et al., 2012; Sato et al., 2021).

Na literatura, há uma vasta coleção de estudos que investigaram a capacidade antimicrobiana de óleos essenciais frente a diferentes tipos de microrganismos. Um exemplo é o estudo de Oliveira et al. (2022), que avaliou a atividade antimicrobiana de diversos óleos essenciais contra bactérias clinicamente relevantes. Da mesma forma, Souza et al. (2020) analisaram a capacidade antimicrobiana do óleo de alecrim

contra várias cepas de *Escherichia coli*. Carvalho et al. (2021), por sua vez, investigaram as atividades antimicrobiana e antioxidante do óleo essencial de pau rosa frente a cepas de *E. coli*, *S. aureus* e *P. aeruginosa*.

Em um contexto similar, Rodrigues et al. (2020) avaliaram a atividade antimicrobiana do óleo essencial de capim santo contra cepas de *E. coli* e *S. aureus*. Esses estudos destacam o potencial dos óleos essenciais como agentes antimicrobianos eficazes contra uma variedade de patógenos, e evidenciam a importância de investigações contínuas para entender melhor suas aplicações terapêuticas e suas possíveis interações com microrganismos específicos.

Em relação aos bio-óleos derivados de processos pirolíticos de biomassa lignocelulósica do açaí, há uma lacuna significativa na literatura quanto à avaliação específica de sua capacidade antimicrobiana. A maioria dos estudos disponíveis se concentra em outros materiais lignocelulósicos, como óleo de soja, borra de café e serragem de eucalipto, como mencionado no estudo de Beker et al. (2014). Neste estudo, os autores investigaram o potencial antimicrobiano de bio-óleos derivados desses materiais, utilizando hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) e hidróxido de sódio (NaOH) como compostos de impregnação química para uso em óleo diesel e biodiesel de soja, frente a diversas cepas de bactérias e fungos. Na tabela 2 é possível observar os resultados da atividade antimicrobiana referente ao trabalho de BEKER et al (2014).

**Tabela 2.** Concentração inibitória mínima (CIM) e Concentração biocida mínima (CBM) da mistura (bio-óleo+B10) para os inóculos testados.

	1 dia		2 dias		5 dias		7 dias		10 dias	
	CIM	CBM	CIM	CBM	CIM	CBM	CIM	CBM	CIM	CBM
<i>Paecilomyces variotii</i>	2%	>10%	2%	5%	3%	4%	4%	4%	4%	4%
<i>Candida silvicola</i>	2%	6%	2%	5%	2%	4%	4%	4%	4%	4%
<i>Bacillus pumilus</i>	1%	>10%	1%	>10%	1%	3,3%	1%	3,3%	1%	3,3%
Inóculo não-caracterizado	0,25%	0,5%	0,25%	0,5%	0,25%	0,5%	0,25%	0,5%	0,25%	0,5%

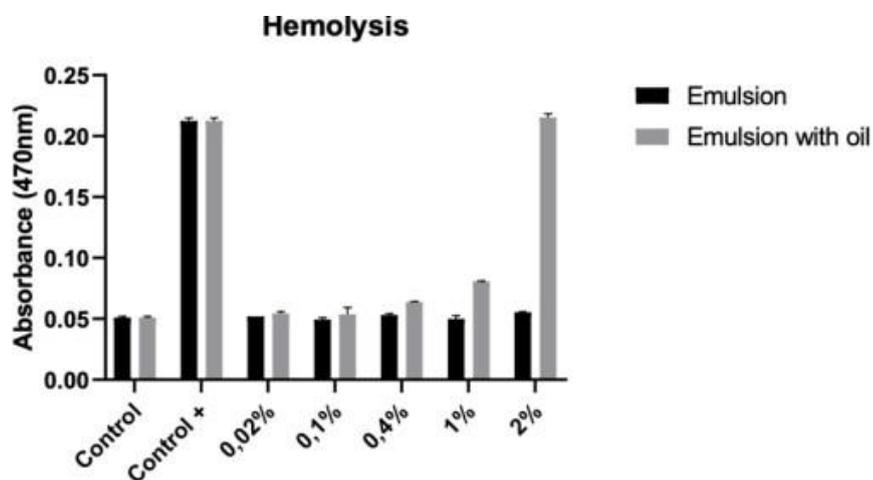
**Fonte:** Extraído de Beker et al (2014).

Outro estudo relevante foi conduzido por Mashiba et al. (2019), que analisou a atividade antimicrobiana e antioxidante de frações de lignina pirolítica. Esta pesquisa destaca a importância de explorar não apenas os bio-óleos derivados da pirólise, mas também outros subprodutos como a lignina, para compreender seu potencial

antimicrobiano e antioxidante. No entanto, até o momento, há uma carência de estudos específicos que investiguem a capacidade antimicrobiana dos bio-óleos derivados do açaí, apontando para a necessidade de mais pesquisas nessa área para preencher essa lacuna de conhecimento.

Nesse contexto, a avaliação da citotoxicidade é um aspecto crucial ao considerar a aplicação de bio-óleos, especialmente devido à presença de compostos fenólicos que possuem propriedades antioxidantes e nutricionais, mas também podem apresentar efeitos adversos em concentrações elevadas, incluindo a indução de morte celular. No estudo realizado por Filho et al (2023), o óleo de açaí e o óleo de castanha do Brasil foram utilizados para desenvolver nanoemulsões, e sua viabilidade e citotoxicidade foram avaliadas em células C6 (glioma) e células gliais. Além disso, o estudo investigou o potencial de hemólise em células sanguíneas. Os resultados indicaram que concentrações elevadas dos óleos resultaram em hemólise, enquanto concentrações até 0,4% não causaram hemólise significativa, como pode ser visto na figura 15.

**Figura 15.** Ensaio de hemólise.



**Fonte:** Extraído de Filho et al (2023)

### 3.7.2.1. Mecanismos de ação dos óleos e seus compostos

Os óleos essenciais e seus compostos predominantes atuam sobre uma variedade de alvos celulares, com ênfase na membrana plasmática. Em algumas situações, esses óleos podem causar alterações profundas na estrutura celular. A sua característica hidrofóbica desempenha um papel crucial na destruição das membranas celulares bacterianas, resultando em um aumento da permeabilidade devido à dificuldade de separação do óleo da membrana.

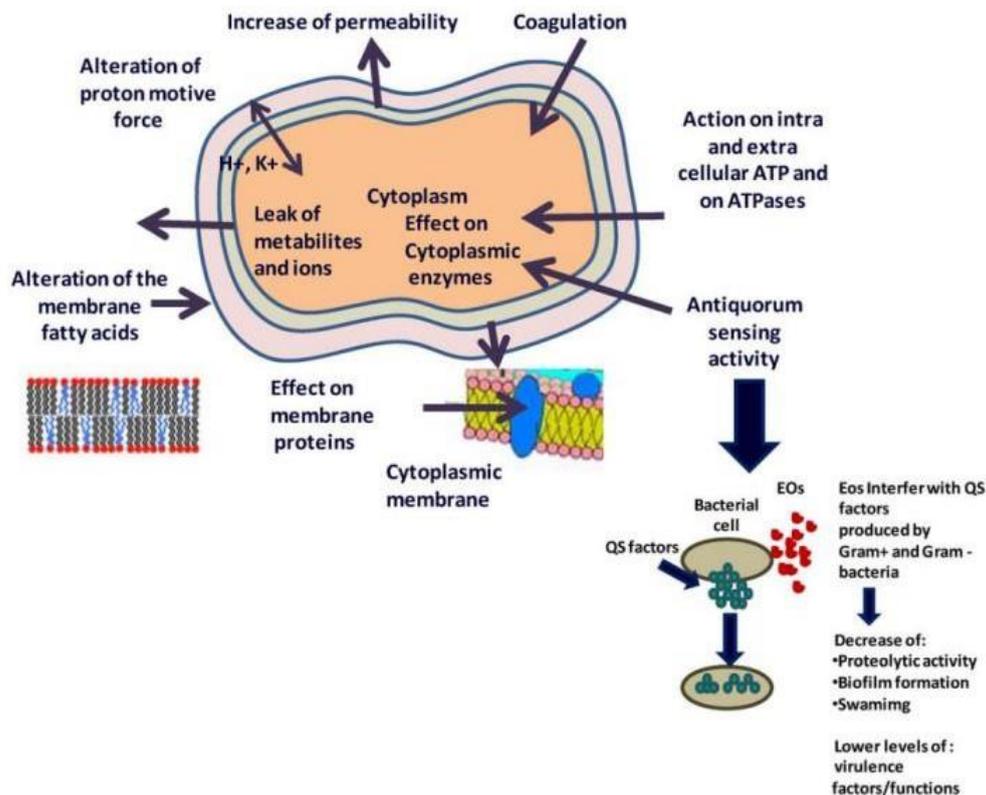
Os mecanismos de ação dos óleos essenciais são variados e incluem a degradação da parede celular (Gill e Holley, 2006), danos à membrana citoplasmática, coagulação do citoplasma, incremento da permeabilidade celular e diminuição dos níveis de ATP intracelular. Os compostos desses óleos também podem afetar as proteínas na membrana celular, as quais são frequentemente responsáveis pelo transporte de moléculas essenciais para o interior da célula. Tais efeitos levam à desestabilização da bicamada lipídica das membranas celulares, comprometendo sua estrutura, resultando na perda de componentes intracelulares importantes e na inativação de mecanismos enzimáticos (Nazarro et al., 2013; Albano et al., 2016).

A interrupção do transporte de elétrons, a translocação de proteínas e a síntese de componentes celulares são alterações fisiológicas que podem induzir a lise e morte celular (Turina et al., 2006). A presença de compostos antimicrobianos no ambiente pode levar as bactérias a modificarem a síntese de ácidos graxos e proteínas de membrana para ajustar sua fluidez. Óleos essenciais, especialmente aqueles ricos em fenóis, têm a capacidade de penetrar na bicamada fosfolipídica das paredes celulares bacterianas, ligando-se às proteínas e interferindo em suas funções normais. Isso demonstra que a membrana celular é o principal alvo desses óleos.(Albano et al., 2016).

O efeito dos óleos essenciais não se restringe à superfície da célula; ele se estende também ao citoplasma. Em concentrações subletais de antimicrobianos, os microrganismos tentam se adaptar aumentando a expressão de proteínas de resposta ao estresse para reparar proteínas danificadas (Burt et al., 2007). No entanto, em concentrações mais elevadas, essa resposta adaptativa não é suficiente para prevenir a morte celular, um fenômeno mais pronunciado em bactérias Gram-positivas. Em

contraste, as paredes celulares das bactérias Gram-negativas são mais resistentes aos óleos essenciais, tornando a penetração de moléculas hidrofóbicas menos eficiente (Albano et al., 2016). A Figura 16 ilustra os diferentes mecanismos de ação dos óleos essenciais e seus compostos, destacando possíveis pontos de interação com a célula bacteriana.

**Figura 16.** Mecanismos e sítios de ação dos óleos essenciais e seus compostos nas células bacterianas.



**Fonte:** Extraído de Nazarro et al (2013)

Na revisão de Gyawali e Ibrahim (2014), os grupos hidroxílicos (-OH) em compostos fenólicos são destacados por sua ação inibidora. Esses grupos podem interagir com a membrana celular bacteriana, desestabilizando-a e causando lise e liberação de componentes celulares. Além disso, eles facilitam a troca de elétrons por prótons, reduzindo o gradiente através da membrana e resultando no colapso da força próton-motriz, esgotamento do ATP e morte celular.

Nesse contexto, foi observada a necessidade de desenvolvimento de pesquisas visando o reaproveitamento dos resíduos agroindustriais da cultura do açaí. Uma ampla avaliação das atividades biológicas do bio-óleo do caroço e da fibra do açaí são importantes sob o ponto de vista técnico-científico, uma vez que quando são conhecidas todas as propriedades referentes a esses materiais, podem ser propostas novas formas de reutilização a fim de gerar maior valor agregado ao resíduo, e assim transformá-lo em matéria-prima para novos produtos industriais e farmacêuticos. Logo, o objetivo deste trabalho foi a avaliação das atividades antimicrobiana, antioxidante e citotóxica do bio-óleo da semente e da fibra do açaí.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Processo de produção do bio-óleo

O processo de produção do bio-óleo é feito por meio da pirólise em escala laboratorial, que é uma versão miniaturizada em comparação com o processo industrial. Inicialmente, as sementes de açaí (*Euterpe oleracea Mart.*) descartadas nas ruas e calçadas são coletadas e armazenadas em sacos plásticos. Essas sementes passam por pré-tratamentos físicos e químicos para separar a lignina da biomassa. (Valois et al., 2023; Valdez et al., 2023). O procedimento detalhado será descrito a seguir:

#### 4.1.1. PRÉ-TRATAMENTO FÍSICO DAS SEMENTES DE AÇAÍ (*EUTERPE OLERACEA, MART.*)

As sementes de açaí (*Euterpe oleracea Mart.*) foram submetidas a um processo de secagem controlada em uma estufa, que opera a uma temperatura constante de 105°C por um período de 24 horas. Esse procedimento visa garantir que as sementes sejam desidratadas de maneira uniforme e eficaz. Após a secagem, as sementes foram trituradas em um moinho de facas de laboratório, que reduz o material a um pó mais fino e homogêneo. Na etapa seguinte, o pó obtido é peneirado utilizando um conjunto de peneiras com malhas de diferentes tamanhos. Esse processo de peneiramento tem o objetivo de remover o excesso de material fibroso e ajustar o diâmetro das partículas para atender aos requisitos específicos da análise subsequente. A peneiração ajuda a garantir que o material processado seja uniforme e adequado para as etapas seguintes do experimento (Valois et al., 2023; De Castro et al., 2019). Os procedimentos de secagem, moagem e peneiramento das sementes de açaí são ilustrados na Figura 17, que demonstra claramente cada etapa do processo.

**Figura 17.** . Sementes de Açaí após o pré-tratamento físico. (a). Semente obtida. (b). Sementes secas. (c). Sementes moídas. (d). Sementes peneiradas.



**Fonte:** O autor (2024)

#### 4.1.2. PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO DE SEMENTES DE AÇAÍ (*EUTERPE OLERACEA*, MART.)

Seguindo o pré-tratamento físico descrito na seção 4.1.1, as sementes de açai foram submetidas a um tratamento químico com soluções de KOH e HCl em concentrações de 0,5 M, 1,0 M e 2,0 M. O procedimento foi realizado da seguinte forma: cerca de 60 g de farinha seca, moída e peneirada das sementes são misturadas cuidadosamente com 120 mL das soluções de KOH ou HCl nas concentrações mencionadas, na proporção de 1:2 (massa/volume), em um Becker de 250 mL. A mistura foi mantida à temperatura ambiente e agitada por 30 minutos. Após a impregnação, a suspensão é filtrada usando papel filtro e lavada com 120 mL de água destilada. Em seguida, o material é deixado em repouso por 24 horas, conforme o método descrito anteriormente (Valdez et al., 2023). Após o repouso, o material é seco a  $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  por 24 horas. Finalmente, as sementes secas e impregnadas foram moídas em um pilão de porcelana até obter um pó fino, conforme descrito por Valois et al. (2023). A Figura 18 ilustra o processo de ativação química dos pós finos das sementes de açai utilizando uma solução de KOH 2,0 M.

**Figura 18.** Sementes de Açaí Impregnadas úmidas (a) Fase aquosa (b); (c) Secas



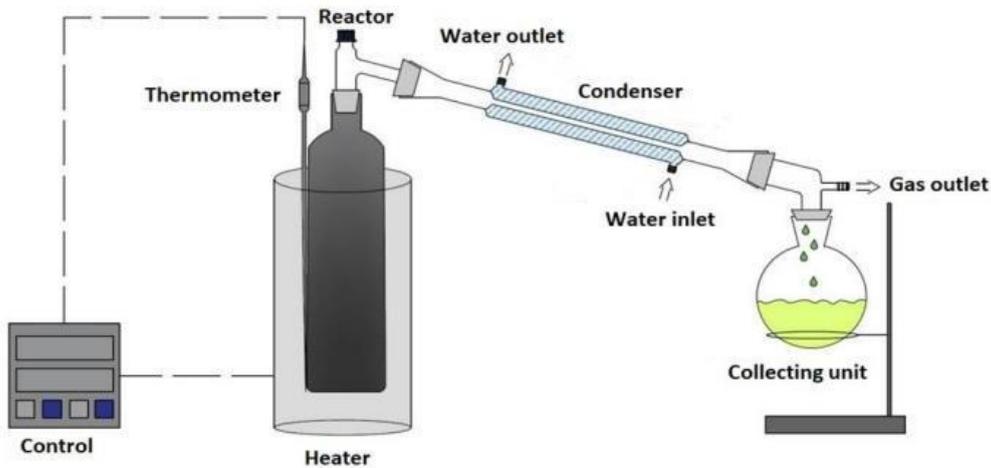
**Fonte:** O autor (2024)

#### 4.1.3. APARATO EXPERIMENTAL

A importância do aparato experimental no processo de pirólise em nível laboratorial é fundamental para garantir a precisão, controle e segurança dos experimentos. A Figura 10 mostra um diagrama de um pequeno reator de vidro borossilicato usado em experimentos de laboratório. O reator tem formato cilíndrico, com 3,3 cm de diâmetro e 22,8 cm de altura, e um volume de 195 mL. Ele é colocado dentro de um forno cilíndrico que possui um sistema de aquecimento cerâmico de 800 W, com a temperatura controlada por um controlador digital. (Valois et al., 2023; Valdez et al., 2021; De Castro et al., 2019).

A temperatura dentro do reator é medida por um termopar tipo K. Na saída do reator, está instalado um condensador Liebig, conectado através de uma junção em forma de Y. Os líquidos condensados são coletados em um frasco de vidro borossilicato de 50 mL. Os gases que não se condensam são direcionados para um sistema flare através de uma abertura em uma curva de 90°, localizada entre o condensador Liebig e o funil de separação de vidro (Valois et al., 2023; Valdez et al., 2021; De Castro et al., 2019).

**Figura 19.** Esquema de pirólise em escala laboratorial.



Fonte: Extraído de Valois et al.,( 2023).

#### 4.1.4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

As sementes de açaí, previamente ativadas quimicamente, são pesadas em torno de 40,0 g utilizando uma balança semianalítica. Em seguida, essas sementes são colocadas no reator de vidro. Após a instalação do reator no sistema, este é conectado ao condensador Liebig, que por sua vez é ligado ao funil de separação. O sistema de refrigeração é ativado, mantendo a temperatura da água em 10°C.(Valois et al., 2023).

A seguir, configura-se a taxa de aquecimento desejada (10 °C/min) e a temperatura alvo do reator (350, 400 ou 450 °C). Quando a temperatura desejada é atingida, ela é mantida por 30 minutos. Durante esse período, a temperatura do reator é monitorada a cada 10 a 15 minutos. Após o processo, o peso da fase líquida (composta por bio-óleo e fase aquosa) e do biocarvão é medido. O peso do gás é determinado subtraindo o peso combinado do líquido e do biocarvão do peso total da matéria-prima. O bio-óleo é separado da fase aquosa por decantação no funil de separação e, posteriormente, analisado quanto às suas propriedades físicas e químicas, incluindo o valor ácido (Valois et al., 2023).

## 4.2. Obtenção do bio-óleo

O bio-óleo extraído do resíduo da semente do açaí foi cedido pelo Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LAESA) da Universidade Federal do Pará. As amostras fornecidas passaram por diferentes processos de temperatura de 350, 400 e 450 °C respectivamente. Bem como pré-tratamento físico e pré-tratamento químico com Hidróxido de Potássio (KOH) e Ácido clorídrico (HCl).

As amostras obtidas foram divididas em grupos de acordo com o produto gerado no processo de pirólise e podem ser denominadas Água de Lavagem, Produto Líquido Orgânico (PLO) e Fração Aquosa, como pode ser visto na figura 20.

**Figura 20.** Esquema da obtenção das amostras



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2024)

- A) Água de lavagem:** As amostras referentes a água de lavagem correspondem ao líquido residual obtido na filtração no pré-tratamento químico anterior ao processo de pirólise.
- B) Fração aquosa:** A fração aquosa é uma parte da fase líquida obtida do processo de pirólise. Após a obtenção da fase líquida, essa porção é filtrada e a parte menos densa é caracterizada como fração aquosa.
- C) Fração orgânica:** Essa fração corresponde ao bio-óleo propriamente dito. É caracterizado como a parte mais densa na fase líquida da pirólise por conter muitos hidrocarbonetos em sua composição.

### 4.3. Preparo das amostras do bio-óleo

#### 4.3.1. ÁGUA DE LAVAGEM

A água de lavagem foi obtida em momento anterior ao processo de pirólise, a partir da adição de água destilada após a impregnação ácida ou básica da biomassa de açaí, a qual foi submetida à filtragem. Então, após a coleta da água de lavagem, a amostra foi preparada em diluições com água destilada nas proporções de 1:5 (200µL de amostra em 800µL de água destilada); 1:10 (100µL:900µL); 1:20 (50µL:950µL); 1:40 (25µL: 975µL) e 1:80 (12,5µL :987,5µL).

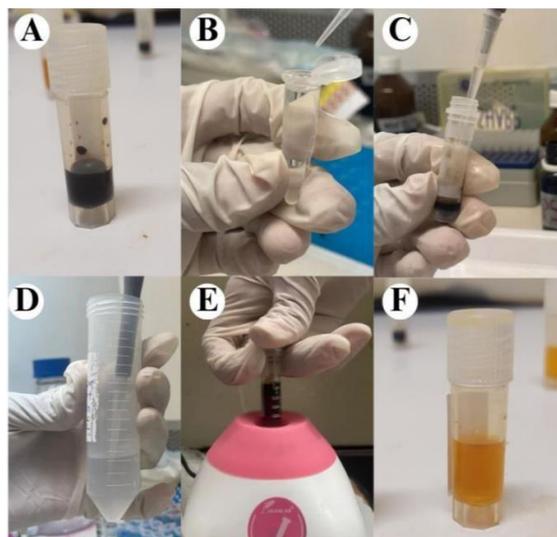
#### 4.3.2. FRAÇÃO AQUOSA

Considerando o caráter polar, as amostras foram diluídas utilizando apenas água destilada, nas proporções de 1:5 até 1:80. O preparo das diluições das frações aquosas foi realizado a partir da diluição de 1:5, onde foi adicionado 200µL da amostra em um microtubo de 1,5 mL e, posteriormente, foi completado com 800 µL de água destilada. Dessa forma, para preparar as diluições 1:10; 1:20; 1:40 e 1:80, foram adicionadas 100 µL; 50 µL; 25 µL e 12,5 µL de amostra em cada microtubo, respectivamente, e completou-se o volume de 1000 µL com a adição de água destilada.

#### 4.3.3. FRAÇÃO ORGÂNICA (PLO)

As amostras da Fração orgânica foram classificadas de acordo com impregnação e temperatura. Devido ao caráter apolar da amostra (Figura 21.A), foi realizada a diluição das amostras (1:20 até 1:640) de acordo com metodologia própria, onde foi adicionado em um microtubo de 1,5 mL, 800 µL de Dimetilsulfóxido (DMSO) a 10% em PBS 1X e 200µL de amostra para a preparação da primeira diluição seguido de agitação em vórtex (Figura 21.B,C,D e E). A partir da primeira diluição (Figura 21. F) foram realizadas as demais diluições de 1:40,1:80,1:160,1:320 e 1:640 para realização dos testes de viabilidade, antioxidante e antimicrobiano.

**Figura 21.** Etapas da diluição da fração orgânica



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2024)

#### **4.4. Identificação dos componentes por Cromatografia Gasosa (CG-MS)**

A identificação dos componentes presentes nas amostras oleosas dos experimentos realizados em escala piloto foi realizada por Cromatografia Gasosa acoplada Espectrometria de Massa (CG-MS). Este método de análise consiste na volatilização da amostra e no seu transporte por meio de um gás de arraste (fase móvel) através de uma coluna cromatográfica onde ocorre a separação. As análises cromatográficas foram realizadas no sistema de cromatografia para a separação e identificação dos compostos químicos presentes nos bio-óleos produzidos em escala semi piloto e piloto. A análise dos componentes presentes foi realizada no equipamento Agilent Technologies – Modelo CG-7890B acoplado a Espectrômetro de Massas modelo MS5977A, coluna capilar de sílica fundida SLBTM-5ms (30m x 0,25mm x 0,2). (De Castro et al., 2019).

#### **4.5. Avaliação do potencial antioxidante do bio-óleo**

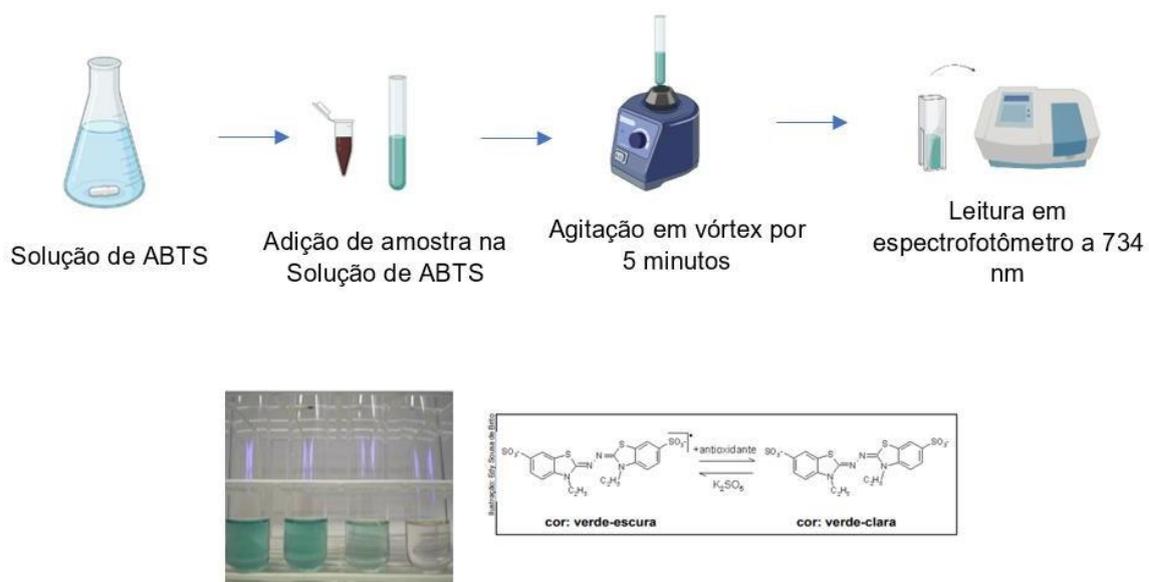
##### **4.5.1. AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE ANTIOXIDANTE UTILIZANDO O MÉTODO DE ELIMINAÇÃO DE RADICAIS ABTS•+ (TEAC).**

Determinou-se a atividade antioxidante pelo método ABTS [2,2-azinobis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfônico)], de acordo com a metodologia sugerida por Re *et al.* (1999). O radical ABTS•+ foi preparado pela reação de 5,0 mL de uma solução de 3840 µg mL<sup>-1</sup> de ABTS com 88 µL da solução de persulfato de potássio de 37.840 µg mL<sup>-1</sup>, a mistura foi deixada em um ambiente escuro por 16 horas. Após formação radical, a mistura foi diluída em etanol até a absorção de 0,7±0,01 a 734 nm.

Tomando-se as concentrações do OE (5 a 150 µg mL<sup>-1</sup>) preparou-se a mistura de reação com o cátion radical ABTS. Em um ambiente escuro, retirou-se uma alíquota de 30 µL de cada concentração do OE e transferiu-se para tubos de ensaio contendo 3,0 mL do cátion radical ABTS e posteriormente homogeneizou-se em um agitador de tubos e após 6 minutos, realizou-se a absorção da mistura de reação em espectrofotômetro de 734 nm. A captura do radical livre foi expressa como um percentual de inibição (%I) da ação radical ABTS de acordo com a Equação 1, onde AbsABTS representa a absorção da solução radical ABTS e ABSAM representa a absorção de a amostra. (Carvalho et al., 2021; Re et al., 1999).

$$\% \text{ Inibition ABTS} = \frac{ABS_{ABTS} - ABS_{Sample}}{ABS_{ABTS}} \times 100$$

**Figura 22.** Esquema da atividade antioxidante pelo método do sequestro do radical ABTS•+ (TEAC)



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2024)

#### 4.5.2. AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE ANTIOXIDANTE PELO MÉTODO DO SEQUESTRO DO RADICAL DPPH•

A atividade antioxidante total foi analisada através da capacidade dos antioxidantes presentes na amostra em sequestrar o radical estável DPPH•(2,2-difenil-1-picril-hidrazina), de acordo com Brand-Williams et al (1995). A quantificação da Atividade Antioxidante foi expressa como média ± desvio-padrão em  $\mu\text{MTrolox.g}^{-1}$  extrato (capacidade antioxidante equivalente ao Trolox).

Com o intuito de determinar a capacidade antioxidante pelo método DPPH do OE. O radical foi preparado pela dissolução de 3,94 mg de DPPH•(2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl) em 100 mL de etanol. A partir das concentrações dos OE's (5 a 150  $\mu\text{g mL}^{-1}$ ) foi preparada a mistura de reação com o cátion radical ABTS. 50  $\mu\text{L}$  de EO foi misturado a 950  $\mu\text{L}$  de etanol, 2 mL de solução radical DPPH, e completado até 4 mL com etanol, e novamente homogeneizado. A mistura foi deixada para reagir no escuro por 30 minutos e a absorção da mistura de reação foi realizada em espectrofotômetro de 517 nm.

A captura do radical livre foi expressa como um percentual de inibição (%I) da ação radical DPPH de acordo com a Equação 2 adaptada de Babili *et al.* (2011), onde  $ABS_{DPPH}$  representa a absorção da solução radical DPPH e  $ABS_{DPPH}$  representa a absorção da amostra.

$$\% \text{ Inibition DPPH} = \frac{ABS_{DPPH}}{ABS_{DPPH}} - ABS_{Sample} \times 100$$

**Figura 23.** Avaliação da atividade antioxidante pelo método do sequestro do radical DPPH•



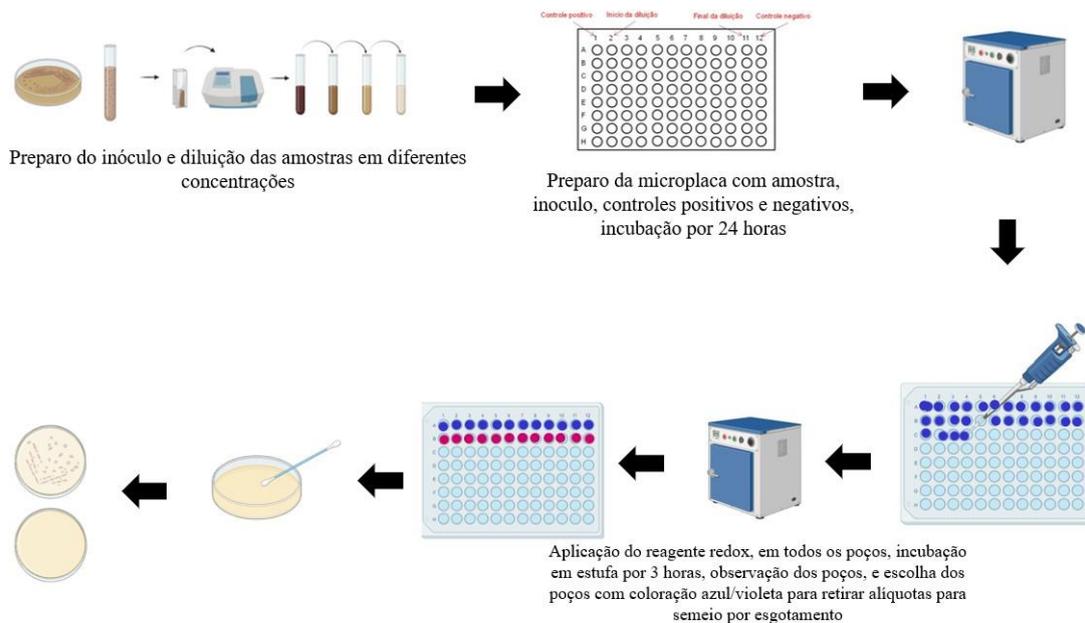
**Fonte:** Elaborado pelo autor (2024)

#### 4.6. Avaliação da atividade antimicrobiana do bio-óleo

A ressuspensão do Inóculo foi realizada 24 horas antes da semeadura em Ágar Mueller Hinton (AMH), meio não seletivo, com poucas interferências, a semeadura será colocada em estufa a 36° C. Após esse período, em tubo esterilizado, foram inoculadas de 3 a 5 colônias de bactérias em 5 ml de caldo Mueller Hinton, CMH, previamente esterilizado, e em seguida levadas ao espectro até obter concentração de 1.108 unidades formadoras de colônias, UFC. , após atingir esta concentração foi diluído com CMH até concentração de 5,105 UFC/ml. As amostras foram diluídas com dimetilsulfóxido, DMSO, 10% e CMH, nas concentrações de 1000 µg, 500 µg, 250 µg, 125 µg e 62,5 µg. Após a diluição do inóculo e da amostra, foram inoculados 100 µg de cada na placa de 96 poços, assim como o controle positivo e negativo, esta placa será incubada em estufa por 24 horas. Após este período, a concentração inibitória mínima, MIC, foi verificada com base na turbidez ou com reagente redox. A concentração bactericida mínima, CBM, foi realizada retirando-se 10 µl dos poços escolhidos e semeados em placas de AMH por exaustão, colocadas em estufa por 24

horas a 36° C, após esse período foi contada a UFC para determinação da concentração bactericida mínima, CBM. (CLSI M07 11ª edição).

**Figura 24.** Esquema da atividade antimicrobiana



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

## 4.7. Ensaio de viabilidade celular

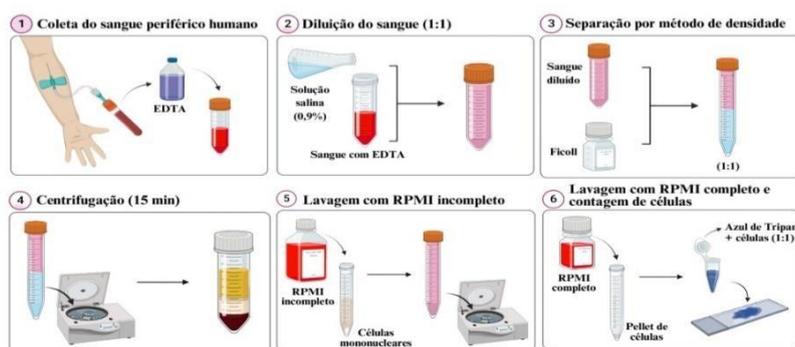
### 4.7.1. COMITÊ DE ÉTICA

Para avaliar a viabilidade celular, foi coletado sangue venoso humano de voluntários saudáveis que assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE). Este estudo foi aprovado pelo Comitê Institucional de Ética em Pesquisa envolvendo seres humanos do setor de ciências da saúde da UFPA (CEP-ICS/UFPA), sob nº 3544380 e CAAE 12776619.0.0000.0018.

#### 4.7.2. OBTENÇÃO DE CÉLULAS MONONUCLEARES DO SANGUE PERIFÉRICO (PBMC)

As amostras de sangue (5 mL de sangue venoso) foram coletadas com ácido etilendiaminotetracético (EDTA) (New Prov) a 5% (Figura 25.1), posteriormente adicionado 5 mL de solução salina 0,9% e homogeneizado (Figura 25.2), posteriormente transferido outro tubo contendo 3mL de Histopaque®-1077 (SIGMA-ALDRICH®) (Figura 26.3). Em seguida o tubo foi centrifugado 15 minutos à 1500 RPM, separando a camada leucocitária mononuclear (Figura 25.4) . Posteriormente a camada leucocitária foi coletada e lavada com RPMI 1640 (Figura 25.5) e centrifugada para obter o pellet de células. As células foram ressuspensas em 1mL de RPMI-1640 suplementado (1% de penicilina/estreptomicina e 10% de Soro Bovino Fetal) para a contagem de células viáveis, através da coloração com Azul de Trypan 0,4% (Figura 25.6).

**Figura 25.** Delineamento experimental da obtenção de PBMC.



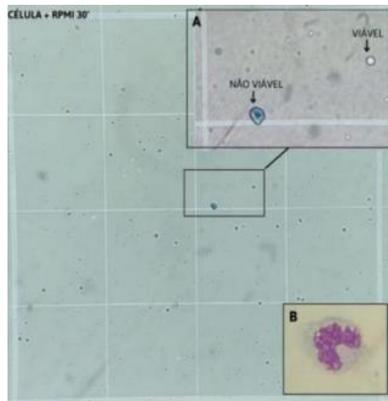
**Fonte:** Elaborado pelo autor (2024)

#### 4.7.3. MÉTODO DE EXCLUSÃO DO CORANTE AZUL DE TRIPAN E AVALIAÇÃO DA MORFOLOGIA CELULAR

Para o ensaio de viabilidade celular,  $2 \times 10^5$  células foram incubadas com as frações em diferentes diluições por 30 min em estufa de CO<sub>2</sub> 5% a 37°C e, então, em um microtubo, uma alíquota de 50µL foram coradas com Azul de Tripán a 0,4% na proporção 1:1 e avaliado em hemocitômetro para contagem celular. Células coradas foram consideradas não-viáveis e as translúcidas viáveis (Figura 25.A). Para calcular a porcentagem de células viáveis foi utilizada a fórmula: número de células viáveis/número total de células contadas x 100. Para avaliar a morfologia celular, após

o tempo de incubação uma alíquota de 60 $\mu$ L foi citocentrifugado e posteriormente corada com corante panótico (Newprov) (Figura 25.B).

**Figura 26.** Avaliação da viabilidade celular por Azul de Trypan. (A) Células viáveis e não viável (B) Monócito viável na amostra (100x).



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2024)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Composição química do bio-óleo por Cromatografia Gasosa (CG-MS)

A Cromatografia gasosa é definida como um método físico-químico de separação, em que a amostra é vaporizada e, em seguida, injetada no interior de uma coluna, entrando em contato com duas fases: móvel e estacionária. Diversas variáveis químicas e físicas influenciam na qualidade da separação, a qual é determinada pela resolução da eluição (Sousa et al., 2015). Após a realização das pirólises, os bio-óleos derivados da biomassa da semente do açaí foram analisados pela técnica de cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC/MS) para a caracterização e identificação dos principais constituintes presentes nos produtos obtidos.

As substâncias identificadas na CG-MS estão contidas na tabela 3, é possível destacar os compostos fenólicos como sendo majoritários na composição do bio-óleo (55.70%), seguido por hidrocarbonetos cíclicos e aromáticos (11.89%) e hidrocarbonetos lineares (9.64%). Estas informações estão de acordo com as encontradas na literatura destacada por Sousa et al., (2015) onde os compostos encontrados majoritariamente nos bio-óleos pirolisados de sementes de acerola em 550°C e em 650°C em ordem decrescente foram: ácido 9-octadecenoico, ácido palmítico, ácido linoleico, fenol e p cresol.

Estudos semelhantes registrados na literatura como de Gois et al., (2021), que afirma que a composição das frações aquosas de pirólise apresentou uma mistura de compostos onde estão presentes cetonas, ácidos, fenóis, nitrogenados, álcoois, compostos com funções mistas. Todas as frações aquosas possuem os fenóis como sendo a classe de compostos majoritários nas amostras. O percentual de área variou de 25% (vagem de feijão) em até quase 70% (semente de uva) dentre as outras classes de compostos. As frações aquosas de casca de pinhão, semente de goiaba e semente de uva apresentaram os maiores percentuais dentre as demais, acima de 50%. Este fato se deve ao maior teor de lignina em relação ao conteúdo de holocelulose presente na biomassa o que pode ser observado no bio-óleo do açaí.

De acordo com a literatura no trabalho de Silva et al., (2019), onde Ácidos de cadeia longa, como o palmítico, oleico e linoleico também foram identificados neste

trabalho, sendo derivados provavelmente do craqueamento térmico do óleo contido no resíduo de acerola. Assim como compostos fenólicos sendo a maioria dos encontrados. Isso deve-se ao aumento da temperatura de pirólise, onde reações secundárias de degradação térmica são favorecidas, facilitando a quebra destes compostos em substâncias de menor massa molecular.

Este fator pode ser visto por meio do trabalho de Costa et al.,( 2016) onde relatou que os bio-óleos são constituídos principalmente por compostos oxigenados, sendo eles pertencentes às classes dos fenóis, cetonas, aldeídos e éteres. Em todas as biomassas verificou-se a presença majoritária de compostos fenólicos, seguidos de cetônicos e minoritariamente compostos das outras classes.

Em relação a composição do bio-óleo do açaí , a lignina é formada por uma rede complexa de unidades fenilpropanóides formadas através da polimerização oxidativa de álcoois cumarílico, coniferílico e sinapil. Durante a pirólise, a despolimerização das cadeias reticuladas ocorre nas ligações carbono-carbono e aril-éter. Foi demonstrado que a presença de íons K e Na tem um impacto claro em produtos derivados de lignina, aumentando o rendimento de fenóis no trabalho de Mahadevan et al. (2016). A quantidade de bio-óleo produzido aumentou com a ativação química, bem como a concentração de compostos fenólicos.

**Tabela 3.** Composição química do bio-óleo obtido através da pirólise de sementes do açaí a 450°C

<b>Chemical compound</b>	<b>Bio-oil (Area %)</b>
<b>Linear hydrocarbons</b>	<b>9.64</b>
Undecane	1.12
Tridecane	2.48
Pentadecane	2.29
Dodecane,5,8-diethyl	1.63
6-tridecene	2.12
<b>Cyclic and aromatic hydrocarbons</b>	<b>11.89</b>
Cyclohexene,6-(2-butenylidene)- 1,5,5-trimethyl	1.85
Naphthalene	4.40
Naphthalene,1-methyl	2.39
1H-Indene,1-ethylidene	3.25
<b>Carboxylic acids</b>	<b>8.53</b>
Dodecanoicacid	4.31
Tetradecanoicacid	4.22
<b>Esters</b>	<b>4.07</b>
Undecanoicacid,10-methyl-,methylester	1.10
Methyltetradecanoate	2.97
<b>Ketones</b>	<b>3.53</b>
2-Pentanone,4-hydroxy-4-methyl	<b>1.88</b>
2-Cyclopenten-1-one,2,3-dimethyl	1.65
<b>Phenolic compounds</b>	<b>55.70</b>
Phenol	15.93
Methylphenol	20.53
Dimethylphenol	10.09
Methoxyphenol	4.58
Ethylmethoxyphenol	4.57
<b>Furans</b>	<b>5.75</b>
Benzofuran,2-methyl	1.88
Furan,2-(2furanylmethyl)-5-methyl	2.09
Benzofuran,4,7-dimethyl	1.78
<b>Aldehydes</b>	<b>0.91</b>
Cinnamaldehyde, $\beta$ -methyl-	0.91
<b>Total</b>	<b>100</b>

Fonte: O autor (2024)

A Tabela 4 exibe a composição química em área.% do cromatograma GC-MS de ambas as fases líquidas (fases aquosa e orgânica do bio-óleo) formadas pela pirólise do açaí ativado com KOH 2,0 M de sementes a 450°C. Conforme proposto por Mahadevan et al. (2016), e outros autores, não foi identificado levoglucosano no bio-óleo ou na fase aquosa obtida da pirólise ativada por KOH. Notavelmente, o número de ácidos carboxílicos no bio-óleo foi reduzido de 8,53 para 0,97%, e de acordo com o proposto por esses autores, os ácidos carboxílicos como ácidos acéticos deveriam aumentar na fração líquida (Yang et al., 2006; Patwardhan et al., 2010; Mahadevan et

al., 2016). Chen et al., 2021, não conseguiram identificar a presença de ácido acético e sugeriram que a neutralização ácido-base do aditivo alcalino era a causa. Houve aumento na presença de compostos cetônicos de 3,53 para 7,07%, e Mahadevan et al. 2016, observaram que a concentração de ácido acético pode ser afetada pelas reações de cetonização de ácidos carboxílicos em cetonas. As cetonas podem ser posteriormente desoxigenadas em hidrocarbonetos através da descarboxilação cetônica, gerando os hidrocarbonetos presentes no bio-óleo (Simakova et al., 2016). A concentração de compostos fenólicos diminuiu de 55 para 43%, contrariando o proposto por estes autores, onde a formação de compostos fenólicos é favorecida pela presença de íons alcalinos. O número de hidrocarbonetos foi maior para a pirólise ativada por KOH e sugere que alguns compostos fenólicos reagiram ainda mais e formaram hidrocarbonetos. É importante notar que a identificação de compostos através de GC-MS é uma tarefa difícil e ainda mais quando estão envolvidas moléculas ou matrizes complexas, como no caso do bio-óleo orgânico.

**Tabela 4.** Composição química do bio-óleo e da fase aquosa obtida através da pirólise do açaí ativado quimicamente com solução de KOH 2,0M a 450°C.

Chemical compound	Bio-oil (Área %)	Aqueous Phase(Area.%)
<b>Alcohols</b>	<b>10.43</b>	<b>26.61</b>
2,3,4,5,6-Pentamethylbenzyl	1.74	-
2-Furanmethanol	1.58	8.94
Benzenemethanol $\alpha$ -ethyl-4-methoxy Cyclohexanol	1.80	-
5-methyl-2-(1-methylethyl)-, (1 $\alpha$ ,2 $\alpha$ ,5 $\beta$ )	3.80	-
2,4-Dimethyl-2-oxazoline-4-methanol	-	17.67
1-Hexadecanol,2-methyl	1.51	-
<b>Linear Hydrocarbons</b>	<b>12.13</b>	<b>3.39</b>
Decane	1.23	-
Undecane	1.59	-
Tridecane	2.60	-
Tetradecane	2.33	-
7-Tetradecane	2.86	3.39
Nonadecane	1.52	-

**Fonte:** O autor (2024)

Tabela 4. Continuação

Chemical compound	Bio-oil (Área %)	Aqueous Phase(Area.%)
<b>Cyclic and aromatic hydrocarbons</b>	<b>13.59</b>	-
Bicyclo[4.2.0]octa-1,3,5-triene	3.13	-
Ethylbenzene	2.21	-
Toluene	1.95	-
1,2,4,4	1.30	-
Tetramethylcyclopentene		
1,3-Cyclopentadiene, 5-(1-methylpropylidene)	0.89	-
Cyclohexane	3.25	-
Cyclohexane, 1,2,4-tris(methylene)	0.86	-
<b>Nitrogenated compounds</b>	<b>4.38</b>	<b>13.05</b>
4-(2,5-Dihydro-3-methoxyphenyl)butylamine	2.44	-
Tricyclo[3.1.0.0(2,4)]hex-3-ene 3-carbonitrile	1.94	-
N-Tert.-butyl-N-(2-propenyl)amine	-	6.05
2-Propen-1-amine, N,N-bis(1-methylethyl) Aziridine	-	3.62
, 2-(1,1-dimethylethyl)-1-ethyl 3-methyl-,trans-	-	3.38
<b>Carboxylic acids</b>	<b>0.97</b>	<b>9.23</b>
Butanoic acid,4-hydroxy	0.97	-
Butanedioic acid,methylene	-	2.49
Butanoic acid,4-hydroxy	-	6.74
<b>Esters</b>	<b>1.29</b>	<b>3.32</b>
Acetic acid,7-hydroxy		
1,3,4,5,6,7-hexahydro-2H naphthalen-4a-ylmethyl ester	1.29	-
Carbamic acid,phenyl ester	-	3.32
<b>Ketones</b>	<b>7.07</b>	<b>44.38</b>
2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl	1.86	-

Tabela 4. Continuação

Chemical compound	Bio-oil (Área %)	Aqueous Phase(Area.%)
2-Cyclopenten-1-one, 2-methyl	0.90	-
4-(3,7,7-Trimethyl-2-oxabicyclo[3.2.0]hept-3-en-1-yl)but-3-en-2-one	3.02	-
Spiro[2.3]hexan-5-one, 4,4-diethyl	1.29	-
2-Pentanone, 4-amino-4-methyl	-	32.54
2-Propanone,(1-methylethylidene)hydrazone	-	2.29
4-Piperidinone, 2,2,6,6-tetramethyl	-	9.55
<b>Phenolic compounds</b>	<b>42.98</b>	-
Phenol	5.73	-
Methyl phenol	5.60	-
Dimethyl phenol	9.74	-
Trimethyl phenol	8.26	-
Ethyl methyl phenol	4.84	-
Dimethoxy phenol	2.90	-
Ethyl phenol	4.316	-
Ethyl methoxy phenol	2.94	-
<b>Non identified fraction</b>	<b>5.81</b>	-
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Fonte: O autor (2024)

#### 5.1.1. EFEITO DA TEMPERATURA NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS PRODUTOS

A Tabela 5 apresenta a composição química e a acidez da fase aquosa gerada a partir da pirólise das sementes de açaí. Determinou-se os componentes químicos e a acidez da fase aquosa usando a análise GC-MS. Os quadros suplementares S4-S6 fornecem informações detalhadas sobre as funções químicas, soma das áreas de pico, números de CAS e tempos de retenção de todas as moléculas identificadas.

**Tabela 5.** Composição química da fase aquosa obtida por pirólise de sementes de açaí (Euterpe Oleracea, Mart), identificada por CG-MS

Chemical Composition $C_i$ (área.%)	2.0M KOH		
	350°C	400°C	450°C
Alcohols	2.34	20.74	26.62
Carboxylic Acids	4.05	15.02	9.23
Ketones	52.81	44.38	19.69
Oxygenates	40.80	19.86	44.46
$\sum_{i=1}^n C_i$	100.00	100.00	100.00
Acidity (mg KOH/g)	118.9	26.8	17.9

Fonte: O autor (2024)

Estudos semelhantes relatados na literatura identificaram os principais compostos oxigenados na fase aquosa como álcoois, ácidos carboxílicos e cetonas, com os compostos oxigenados restantes, como fenóis, aldeídos e aminas, agrupados na categoria de oxigenados. Zhang et al.(2005), encontraram ácidos carboxílicos, cetonas, fenóis e furanos na fase aquosa produzida pela pirólise da serragem, enquanto Torri e Fabbri, (2014), identificaram ácidos carboxílicos, aldeídos, fenóis, furanos, açúcares e compostos N na fase aquosa produzida pela pirólise do caule do milho. Da mesma forma, Zhou et al (2019), relataram a presença de 485 ácidos carboxílicos, aldeídos, fenóis, cetonas, furanos, furfurais, açúcares e aminas na 486 fase aquosa produzida pela pirólise da palha de milho.

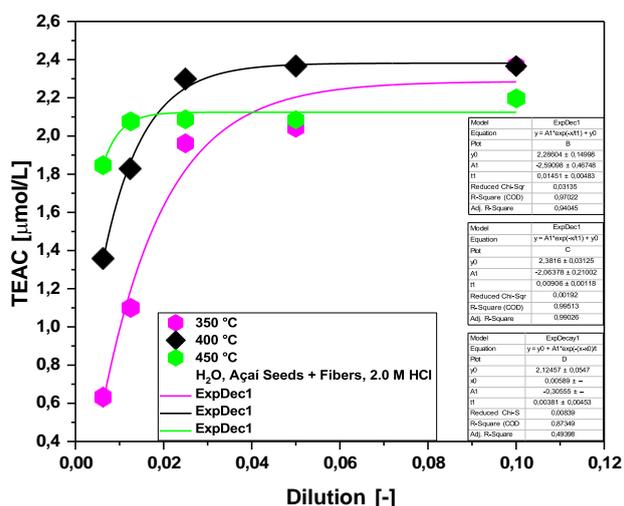
A contribuição dos álcoois para a acidez da fase aquosa é geralmente considerada pequena ou insignificante devido à sua natureza ácida fraca. No entanto, os átomos de  $\alpha$ -hidrogênio das cetonas exibem propriedades ácidas, que contribuem para a acidez geral da fase aquosa. Além disso, sabe-se que os ácidos carboxílicos com comprimentos de cadeia de carbono baixos têm um impacto significativo na acidez da fase aquosa. À medida que a concentração de cetonas diminui, espera-se que a acidez da fase aquosa também diminua.

## 5.2. Avaliação do potencial antioxidante do bio-óleo

### 5.2.1. EFEITO DA TEMPERATURA NA ATIVIDADE ANTIOXIDANTE DO BIO-ÓLEO USANDO O MÉTODO TEAC

A figura 27 mostra a capacidade antioxidante total (TEAC) da fase aquosa obtida via pirólise de sementes de açaí + fibra, ativada quimicamente com soluções de ácido clorídrico (HCl) 2M a temperaturas de 350, 400 e 450°C em escala laboratorial. Os experimentos demonstram que a capacidade antioxidante total medida pelo método TEAC diminui conforme a diluição aumenta, seguindo um padrão de decaimento exponencial de primeira ordem. Observou-se também que, a partir de uma diluição de 1:40, a capacidade antioxidante total em equivalente de trolox diminui consideravelmente, indicando que, para essa relação de diluição, a capacidade antioxidante praticamente se mantém constante.

**Figura 27.** Capacidade antioxidante total (TEAC) da fase aquosa obtida via pirólise de sementes de açaí + fibra, ativada quimicamente com soluções de ácido clorídrico (HCl) 2M a temperaturas de 350, 400 e 450°C em escala laboratorial.



Fonte: O autor (2024)

A degradação termoquímica da biomassa geralmente ocorre em temperaturas mais elevadas, o que resulta na degradação de uma maior quantidade de compostos presentes no bio-óleo, incluindo os compostos fenólicos. Por outro lado, temperaturas mais baixas não apenas favorecem a formação desses compostos, mas também ajudam a preservá-los no bio-óleo (Zhang et al., 2007).

O bio-óleo é predominantemente composto por diversos compostos químicos, tornando-se um produto de alta relevância nos setores alimentício, cosmético e farmacêutico. Entre os componentes essenciais encontrados no bio-óleo, destacam-se os compostos fenólicos, que são de grande interesse devido às suas propriedades

antioxidantes. Esses compostos têm potencial aplicação como antioxidantes naturais, nutracêuticos e conservantes, desempenhando um papel crucial na proteção contra radicais livres e no combate ao estresse oxidativo. Isso contribui para retardar ou prevenir a oxidação de substâncias como DNA, proteínas e lipídios, essencial para prolongar a vida útil de produtos alimentícios, evitando a rancificação e preservando a qualidade e frescor dos alimentos (Del Pozo et al., 2020; Patra et al., 2015; Espindola et al., 2019; Albuquerque et al., 2021).

Além de suas funções antioxidantes, os compostos fenólicos têm sido associados a diversos benefícios à saúde, como propriedades anti-inflamatórias, anticancerígenas e cardioprotetoras. Esses benefícios adicionais fazem com que esses compostos sejam altamente valorizados não apenas na nutrição básica, mas também como componentes essenciais em dietas saudáveis e terapias médicas (; Espindola et al., 2019; Albuquerque et al., 2021; Valois et al., 2023). Portanto, a temperatura durante o processo de pirólise é um parâmetro crucial que determina tanto a quantidade quanto a qualidade dos compostos presentes no bio-óleo. Compreender o impacto da temperatura permite otimizar a produção de compostos como os fenólicos, bem como hidrocarbonetos, garantindo que o bio-óleo atenda aos requisitos específicos de diversas indústrias, desde biocombustíveis até produtos químicos de alto valor agregado nos setores de alimentos, cosméticos e farmacêuticos.(Del Pozo et al; 2020; Patra et al., 2015).

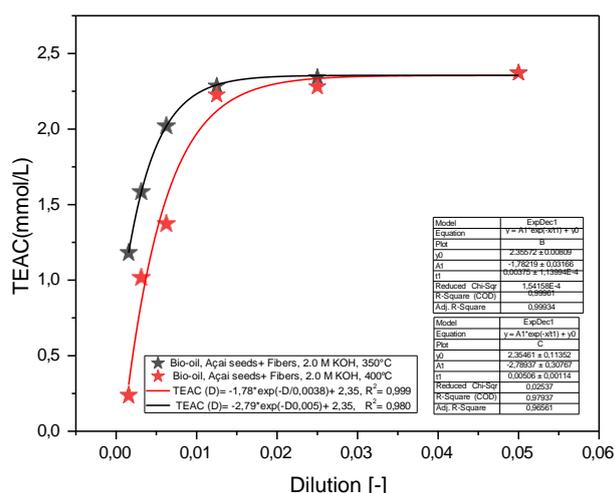
**Tabela 6.** Capacidade antioxidante dos bio-óleos obtidos pela pirólise de sementes de açai (*Euterpe oleracea*, Mart) pelo método de TEAC.

Dilution	TEAC ( $\mu\text{M/L}$ )		
	350°C	400 °C	450°C
1:10	2.34	2.32	2.31
1:20	2.25	2.23	2.08
1:40	1.22	1.19	1.15
1:80	0.96	0.94	0.90
1:160	0.93	0.90	0.87

**Fonte:** O autor (2024)

A Figura 28 apresenta a capacidade antioxidante total (TEAC) da fase orgânica do bio-óleo obtido pela pirólise de sementes de açaí e fibra, quimicamente ativada com soluções de Hidróxido de Potássio (KOH) 2M a temperaturas de 350 e 400 °C em escala laboratorial. Os resultados mostram que a capacidade antioxidante total, medida pelo método TEAC, diminui com o aumento da diluição, seguindo um padrão de decaimento exponencial de primeira ordem e apresenta um coeficiente de determinação(R<sup>2</sup>) de 0.99 para 350°C e 0.98 para 400°C. Além disso, foi observado que, a partir da diluição de 1:80, a capacidade antioxidante total em termos de equivalente de Trolox diminui de forma significativa, sugerindo que, para essa diluição, a capacidade antioxidante se estabiliza.

**Figura 28.** Capacidade antioxidante total (TEAC) da fase orgânica (Bio-óleo) obtida via pirólise de sementes de açaí + fibra, ativada quimicamente com soluções de Hidróxido de potássio (KOH) 2M a temperaturas de 350 e 400°C em escala laboratorial.



**Tabela 7.** Capacidade antioxidante dos bio-óleos obtidos pela pirólise de sementes de açaí (*Euterpe oleracea*, Mart) pelo método de TEAC.

Dilution	TEAC (µM/L)	
	350° C	KOH 2.0 M 400°C
1:10	2.372	2.372
1:20	2.342	2.28
1:40	2.285	2.226
1:80	2.022	1.375
1:160	1.584	1.019
1:320	1.18	0.239

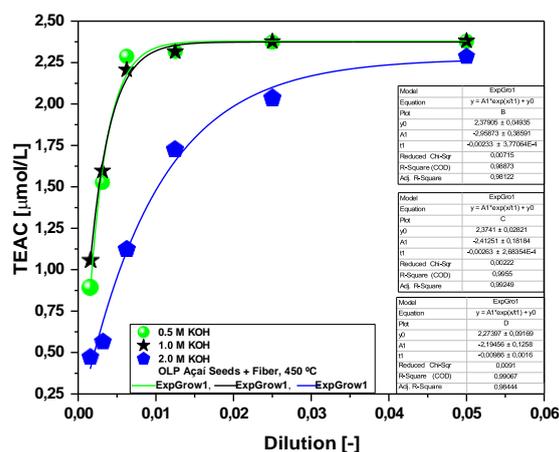
Fonte: O autor (2024)

## 5.2.2. EFEITO DA CONCENTRAÇÃO MOLAR NA ATIVIDADE ANTIOXIDANTE DO BIO-ÓLEO USANDO O MÉTODO TEAC.

A Tabela 8 apresenta a capacidade antioxidante dos bio-óleos produzidos pela pirólise de sementes de açaí (*Euterpe Oleracea*, Mart), utilizando diferentes concentrações de KOH (0,5-2,0 M), a uma temperatura de 450°C e pressão atmosférica, em escala laboratorial. Os dados estão representados graficamente na Figura 30. Os resultados experimentais claramente demonstram que os bio-óleos obtidos a partir da pirólise com soluções de KOH de 0,5 e 1,0 M a 450°C exibiram maior atividade antioxidante em comparação com aqueles produzidos com solução de KOH 2,0 M.

Esses achados sugerem que a elevada atividade antioxidante do bio-óleo proveniente dos resíduos de sementes de açaí, observada em concentrações menores de KOH (0,5 e 1,0 M) apresenta um modelo de crescimento exponencial de primeira ordem e está associada ao aumento na formação de compostos oxigenados nessas condições, particularmente compostos fenólicos, conforme ilustrado na Figura 29.

**Figura 29.** Capacidade antioxidante total (TEAC) da fase aquosa obtida via pirólise de sementes de açaí + fibra, ativada quimicamente com soluções de Hidróxido de potássio (KOH) 450°C a molaridades de 0.5 M, 1.0 M e 2.0 M em escala laboratorial.



Fonte: O autor (2024)

**Tabela 8.** Capacidade antioxidante de bio-óleos obtidos por pirólise de sementes de Açaí (*Euterpe oleracea*, Mart), com diferentes molaridades (solução de KOH de 0,5-2,0 M), a 450° C

Dilution	TEAC ( $\mu\text{M/L}$ )		
	450°C		
	KOH		
	0.5 M	1.0 M	2.0M
1:20	2.45	2.45	2.28
1:40	2.45	2.45	2.03
1:80	2.39	2.39	1.19
1:160	2.36	2.36	1.12
1:320	1.60	1.59	0.56
1: 640	0.97	0.97	0.47

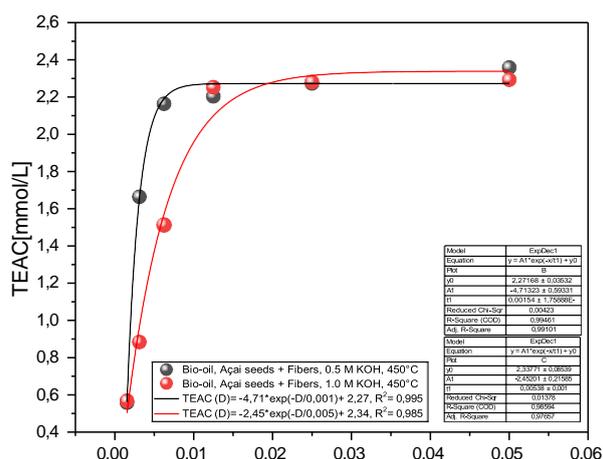
Fonte: O autor (2024)

Os resultados apresentados destacam padrões interessantes nas concentrações de compostos químicos obtidos a partir da pirólise das sementes de Açaí, especialmente sob diferentes condições de molaridade de KOH. A partir do exposto, pode-se discutir várias observações como as de concentrações de hidrocarbonetos, incluindo alcanos, alquenos, aromáticos e hidrocarbonetos cíclicos, aumentam conforme a molaridade de KOH aumenta. Além disso, essas concentrações seguem um modelo de crescimento exponencial de primeira ordem. Esse fenômeno sugere que a presença de KOH em concentrações mais elevadas favorece a formação de hidrocarbonetos durante o processo de pirólise das sementes de Açaí.(Valdez et al., 2023; Valois et al., 2023).

Por outro lado, as concentrações de compostos oxigenados, como álcoois, aminas, ácidos carboxílicos, fenóis, cetonas, furanos e outros, diminuem à medida que a molaridade de KOH aumenta. Esse padrão segue um modelo de decaimento exponencial de primeira ordem. Isso sugere que a presença de KOH em maiores concentrações inibe a formação desses compostos durante a pirólise. Os resultados obtidos neste estudo são consistentes com descobertas anteriores, especificamente com o estudo de De Castro et al (2019), que também investigou a pirólise das sementes de Açaí em condições semelhantes. Isso fortalece a validade dos resultados atuais e sugere que a molaridade do KOH desempenha um papel crucial na composição dos produtos da pirólise.(De Castro et al., 2019; Valois et al., 2023).

A Tabela 9 mostra a capacidade antioxidante dos bio-óleos obtidos por pirólise de sementes de açaí (*Euterpe Oleracea*, Mart) utilizando diferentes concentrações de KOH (0,5 e 1,0 M) a uma temperatura de 450°C e pressão atmosférica, em condições laboratoriais. Esses dados são ilustrados na Figura 30. Os resultados experimentais indicam que a atividade antioxidante dos bio-óleos se reduz com o aumento da diluição, seguindo um padrão de decaimento exponencial de primeira ordem. Observou-se que, com a impregnação de KOH a 0,5 M, a capacidade antioxidante total, medida em equivalente de Trolox, diminui significativamente a partir da diluição de 1:80, sugerindo que a atividade antioxidante se estabiliza a partir desse ponto. Em contraste, com KOH a 1,0 M, a atividade antioxidante caiu de maneira significativa a partir da diluição de 1:40.

**Figura 30.** Capacidade antioxidante total (TEAC) da fase orgânica (Bio-óleo) obtida via pirólise de sementes de açaí + fibra, ativada quimicamente com soluções de Hidróxido de potássio (KOH) 0.5 M e 1.0 M a temperatura de 450°C em escala laboratorial.



Fonte: O autor (2024)

**Tabela 9.** Capacidade antioxidante dos bio-óleos obtidos pela pirólise de sementes de açaí (*Euterpe oleracea*, Mart) pelo método de TEAC.

Dilution	TEAC (µM/L)	
	0.5 M	1.0 M
1:10	2.357	2.292
1:20	2.272	2.28
1:40	2.203	2.252
1:80	2.163	1.513
1:160	1.664	0.885
1:320	0.56	0.57

Fonte: O autor (2024)

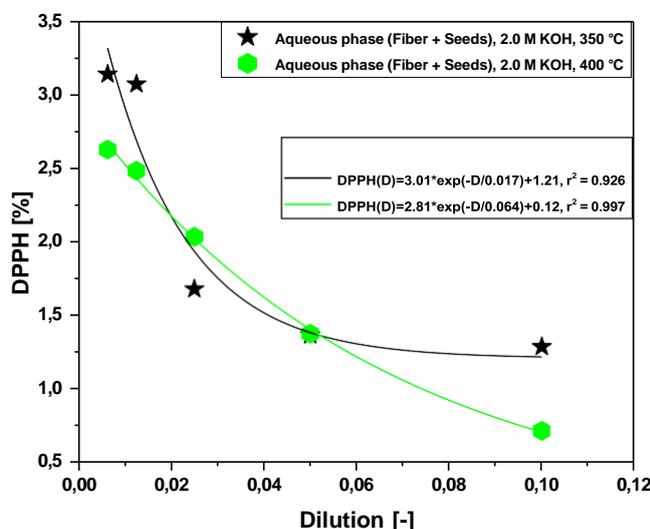
### 5.2.3. EFEITO DA TEMPERATURA NA ATIVIDADE ANTIOXIDANTE DO BIO-ÓLEO USANDO O MÉTODO DE DPPH•

A figura 32 ilustra a capacidade antioxidante (DPPH•) da fase aquosa obtida por pirólise de sementes de açaí e fibra, ativadas quimicamente com soluções de Hidróxido de Potássio (KOH) a 2,0 M, em temperaturas de 350°C e 450°C em escala laboratorial. Os experimentos revelam que a capacidade antioxidante total, medida pelo método DPPH•, aumenta à medida que a captura do radical DPPH• na amostra aumenta, diminuindo sua concentração, seguindo um padrão de decaimento exponencial de primeira ordem.

Além disso, observou-se que a temperatura de 400°C favoreceu uma maior captura do radical DPPH•, conforme mostrado na figura 31. Nessa temperatura, a concentração do radical na solução diminui com o aumento da capacidade antioxidante na diluição de 1:10. Embora a capacidade antioxidante tenha aumentado, sua variação em relação à temperatura de 350°C foi mínima, indicando que, para essa relação de diluição, a capacidade antioxidante se mantém praticamente constante.

Com base na tabela 10, nota-se um aumento na atividade antioxidante à medida que a captura de radicais aumenta. A temperatura de 350°C manteve constante a capacidade antioxidante nas menores diluições (amostras mais concentradas), especificamente nas proporções de 1:10 e 1:20. Em contraste, a temperatura de 400°C mostrou uma maior captura de radicais apenas na diluição de 1:10, indicando que amostras mais concentradas apresentaram uma atividade antioxidante mais elevada nessa faixa de temperatura. Estes resultados são consistentes com estudos anteriores de De Castro et al.(2019) e Valois et al (2023), que demonstram que o aumento da temperatura favorece a diminuição de compostos fenólicos.

**Figura 31.** Capacidade antioxidante pelo método de 1,1-difenil-2-picrilhidrazil (DPPH•) da fase aquosa obtida via pirólise de sementes de açaí + fibra, ativada quimicamente com soluções de Hidróxido de potássio (KOH) 2.0 M a Temperaturas de 350°C e 400°C em escala laboratorial.



Fonte: O autor (2024)

**Tabela 10.** Capacidade antioxidante da fase aquosa de bio-óleos obtidos por pirólise de sementes de Açaí (*Euterpe oleracea*, Mart), com diferentes temperaturas, (350°C e 400°) ativada quimicamente com KOH 2.0 M em escala laboratorial.

Dilution	DPPH (µM/L)	
	350°C	400°C
1:10	1.287	0.717
1:20	1.366	1.376
1:40	1.679	2.033
1:80	3.136	2.482
1:160	3.069	2.626

Fonte: O autor (2024)

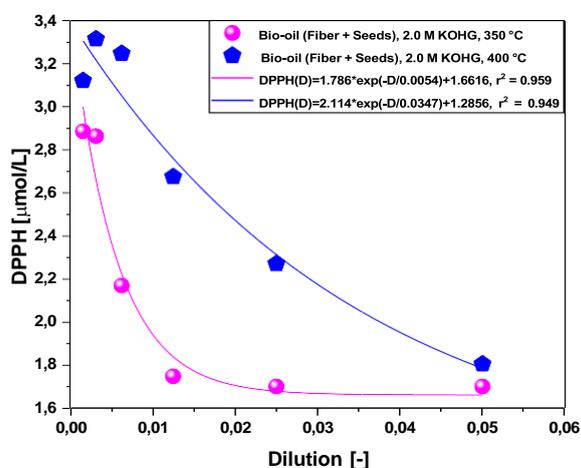
Este trabalho está alinhado com os testes realizados por Freitas et al. (2021), que conduziram um estudo in vitro sobre a atividade antioxidante da castanha do Pará, avaliando a captura do radical livre DPPH. Os resultados mostraram um decaimento na atividade antioxidante conforme a redução das concentrações das amostras. O óleo apresentou uma captura de 71,03%, enquanto a emulsão registrou 67,54%. Em contraste, o BHT consumiu praticamente todo o DPPH, evidenciando sua eficácia como um potente antioxidante.

Resultados semelhantes foram observados no estudo de Oliveira et al. (2018), que analisou a atividade antioxidante dos óleos essenciais de diferentes genótipos de além de seus compostos majoritários. Os óleos demonstraram capacidade antioxidante pelo método de captura do radical livre DPPH. Os óleos essenciais de \*C. grewoides\*, CGR112 e CGR104, apresentaram atividade moderada, com 23,66% e 18,65%, respectivamente. O óleo essencial CGR106, por outro lado, apresentou a maior atividade de eliminação do radical, alcançando 67,91%, seguido pelo óleo essencial CGR126 com 61,98%. Observou-se também que o composto majoritário eugenol, um monoterpene fenólico, demonstrou maior atividade em comparação aos outros compostos testados.

A figura 32 apresenta a capacidade antioxidante (DPPH•) da fração orgânica do bio-óleo obtido pela pirólise de sementes de açaí e fibra, ativadas quimicamente com soluções de Hidróxido de Potássio (KOH) a 2,0 M, em temperaturas de 350°C e 450°C em escala laboratorial. Os experimentos indicam que a capacidade antioxidante total, medida pelo método DPPH•, aumenta à medida que a captura do radical DPPH• aumenta e conseqüentemente sua concentração na amostra diminui, seguindo um padrão de decaimento exponencial de primeira ordem. Além disso, a temperatura desempenha um papel crucial na atividade antioxidante; observou-se que a capacidade antioxidante é maior a 350°C, onde a captura de radicais foi significativamente mais eficiente, resultando em uma redução expressiva dos radicais nessa faixa térmica.

Com base na Tabela 11, houve um aumento da atividade antioxidante à medida que a captura de radicais livres aumentou, resultando na diminuição do composto nas amostras. Esse padrão foi consistente em concentrações mais elevadas, especialmente nas amostras menos diluídas tratadas a 350°C. A captura de radicais e o aumento na capacidade antioxidante foram mais significativos na temperatura de 350°C em comparação com 400°C. Esses resultados destacam uma atividade antioxidante significativa em todas as diluições das amostras da fração aquosa, com ênfase nas amostras menos diluídas à temperatura de 350°C.

**Figura 32.** Capacidade antioxidante pelo método de 1,1-difenil-2-picrilhidrazil (DPPH•) da fração orgânica do bio-óleo obtido via pirólise de sementes de açaí + fibra, ativada quimicamente com soluções de Hidróxido de potássio (KOH) 2.0 M a Temperaturas de 350°C e 400°C em escala laboratorial.



**Fonte:** O autor (2024)

**Tabela 11.** Capacidade antioxidante da fração orgânica de bio-óleos obtidos por pirólise de sementes de Açaí (*Euterpe oleracea*, Mart), com diferentes temperaturas, (350°C e 400°) ativada quimicamente com KOH 2.0 M em escala laboratorial.

Dilution	DPPH (μM/L) KOH (2.0 M)	
	350°C	400°C
1:20	2.145	1.805
1:40	1.701	2.271
1:80	1.748	2.675
1:160	2.170	3.248
1:320	2.864	3.315
1:640	2.886	3.121

**Fonte:** O autor (2024)

A pirólise é um processo complexo que envolve a degradação térmica da biomassa. As condições de reação, especialmente a temperatura, são fundamentais para definir a composição química do bio-óleo (Valdez et al., 2023). Durante esse processo, diferentes temperaturas geram reações intermediárias que levam à formação de diversos compostos químicos no bio-óleo, além de resultarem em fases gasosas e sólidas com características específicas (Serrão et al., 2021).

Os resultados das metodologias TEAC e DPPH evidenciam uma significativa atividade antioxidante do bio-óleo (fração orgânica) em diversas molaridades, tanto para KOH quanto para HCl a 450 °C, nas diluições de 1:80 a 1:160. Essa atividade antioxidante pode ser atribuída à alta concentração de compostos oxigenados, especialmente fenólicos, presentes a essa temperatura.

Recentemente, Valdez et al. (2023) mostraram que temperaturas elevadas (450 °C) durante a pirólise de sementes de açaí ativadas com solução de KOH 2,0 M não favorecem a produção de compostos oxigenados no bio-óleo, resultando em uma predominância de hidrocarbonetos. Em contraste, temperaturas mais baixas (350 °C) promovem a formação de compostos oxigenados, especialmente fenólicos, no bio-óleo dessas sementes. Esses compostos fenólicos estão fortemente relacionados à alta atividade antioxidante, conforme indicado na literatura (Caleja et al., 2017; Espíndola et al., 2019; Albuquerque et al., 2021).

De modo geral, a degradação termoquímica da biomassa indica que altas temperaturas levam à perda de compostos valiosos no bio-óleo, como os fenólicos. Em contrapartida, temperaturas mais baixas não apenas promovem a formação, mas também ajudam a preservar esses compostos (Valdez et al., 2023). Assim, o bio-óleo se destaca como um produto rico em substâncias químicas importantes, sendo especialmente relevante para as indústrias alimentícia, cosmética e farmacêutica.

Os compostos fenólicos desempenham um papel fundamental no bio-óleo e têm gerado grande interesse devido ao seu potencial como fontes naturais de antioxidantes, nutracêuticos e conservantes na indústria alimentícia (Patra et al., 2015). Com propriedades antioxidantes significativas, esses compostos ajudam a neutralizar radicais livres e a diminuir o estresse oxidativo, inibindo a oxidação de DNA, proteínas e lipídios (Espíndola et al., 2019). Além disso, apresentam diversos benefícios à saúde, incluindo propriedades anti-inflamatórias, anticancerígenas e cardioprotetoras (Caleja et al., 2017).

A temperatura na qual a pirólise acontece é um fator fundamental que afeta diretamente tanto a quantidade quanto a qualidade do bio-óleo gerado. Entender como a temperatura influencia esse processo é crucial para otimizar a produção de compostos como fenóis e hidrocarbonetos. Isso garante que o bio-óleo atenda a

padrões específicos para seu uso em indústrias, seja como biocombustível ou em produtos químicos de elevado valor.

#### 5.2.4. EFEITO DA CONCENTRAÇÃO MOLAR NA ATIVIDADE ANTIOXIDANTE DO BIO-ÓLEO USANDO O MÉTODO DPPH.

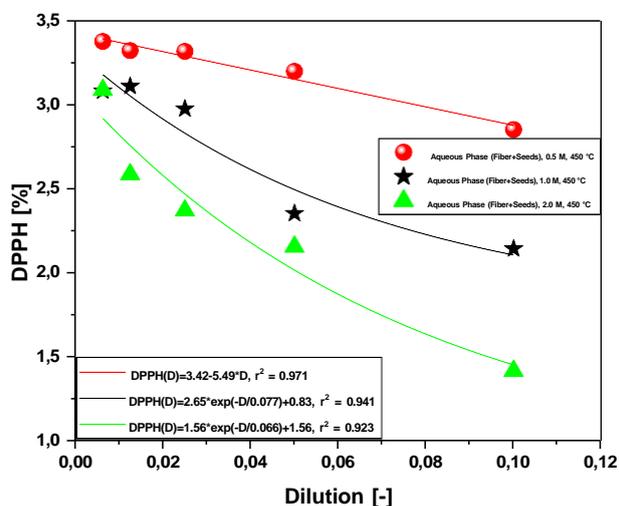
A Tabela 12 apresenta os resultados da capacidade antioxidante da fração aquosa dos bio-óleos obtidos pela pirólise das sementes de açaí (*Euterpe oleracea* Mart), utilizando diferentes concentrações de KOH variando de 0,5 a 2,0 M. O experimento foi realizado a uma temperatura de 450 °C e sob pressão atmosférica, em um ambiente de laboratório. Os dados obtidos são ilustrados graficamente na Figura 33. Os resultados demonstram uma capacidade antioxidante significativa para todas as concentrações de KOH testadas seguindo um modelo de decaimento exponencial de primeira ordem. Notavelmente, a concentração de 2,0 M destacou-se entre as amostras mais diluídas, apresentando uma notável capacidade de captura de radicais livres, resultando em uma inibição extremamente alta nas diluições de 1:10 e 1:20.

**Tabela 12.** Capacidade antioxidante da fração aquosa de bio-óleos obtidos por pirólise de sementes de Açaí (*Euterpe oleracea*, Mart), ativada quimicamente com KOH 2.0 M com diferentes molaridades (0.5 M- 2.0 M) a 450°C em escala laboratorial.

Dilution	DPPH ( $\mu\text{M/L}$ ) KOH(450°C)		
	0.5 M	1.0 M	2.0 M
1:10	0.206	0.256	0.714
1:20	0.199	0.278	1.111
1:40	0.365	0.362	1.694
1:80	0.402	0.583	2.618
1:160	0.893	1.185	2.598

Fonte: O autor (2024)

**Figura 33.** Capacidade antioxidante pelo método de 1,1-difenil-2-picrilhidrazil (DPPH•) da fração aquosa do bio-óleo obtido via pirólise de sementes de açaí + fibra, ativada quimicamente com soluções de Hidróxido de potássio (KOH) em diferentes molaridades(0.5 M- 2.0 M) a temperatura de 450°C em escala laboratorial.



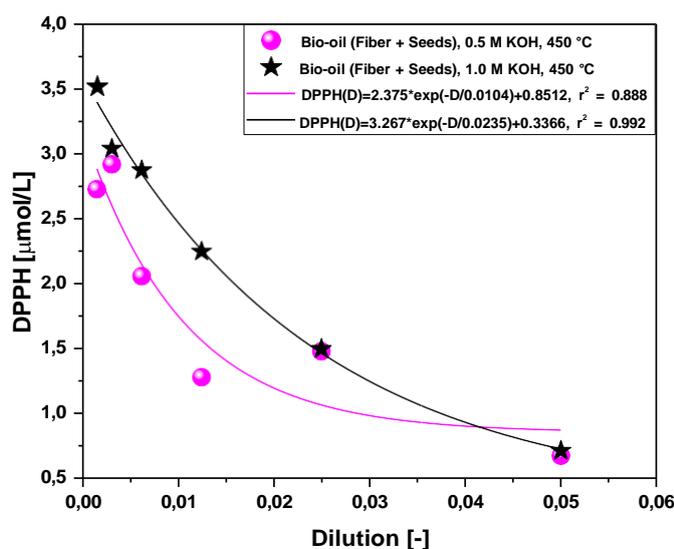
Fonte: O autor (2024)

Como já descrito anteriormente, os resultados demonstram uma relação clara entre a concentração de hidrocarbonetos e a molaridade de KOH. Essa relação evidencia que o aumento da molaridade resulta em maiores concentrações de alcanos, alquenos, compostos aromáticos e hidrocarbonetos cíclicos. Essa tendência pode ser atribuída ao papel do KOH como agente desidratante e desidrogenante, que favorece a formação de hidrocarbonetos a partir de precursores orgânicos, promovendo reações de desidratação e eliminação.(Valois et al., 2023; Valdez et al., 2023; De Castro et al., 2019).

Por outro lado, a diminuição das concentrações de compostos oxigenados, como álcoois, aminas e ácidos carboxílicos, sugere que o KOH promove reações que levam à remoção desses grupos funcionais. Isso pode ocorrer por meio de reações de saponificação, nas quais a presença de KOH favorece a conversão de compostos oxigenados em produtos menos polares, como hidrocarbonetos, ou até mesmo sua degradação.(Valdez et al., 2023).

Os dados sobre a fração orgânica do bio-óleo mostram resultados semelhantes aos estudos previamente citados. Como ilustrado na Figura 34, a capacidade antioxidante dos bio-óleos, produzidos pela pirólise de sementes de açaí (*Euterpe oleracea* Mart), foi analisada utilizando diferentes concentrações de KOH (0,5 M e 1,0 M) a uma temperatura de 450 °C e pressão atmosférica, em escala laboratorial. Os resultados apresentados na Tabela 13 evidenciam que os bio-óleos obtidos com as soluções de KOH nas concentrações de 0,5 M e 1,0 M a 450 °C demonstraram maior atividade antioxidante nas diluições de 1:10 e 1:20, com destaque para a concentração de 1.0M. Observou-se um decaimento exponencial de primeira ordem,

**Figura 34.** Capacidade antioxidante pelo método de 1,1-difenil-2-picrilhidrazil (DPPH•) da fração orgânica do bio-óleo obtido via pirólise de sementes de açaí + fibra, ativada quimicamente com soluções de Hidróxido de potássio (KOH) em diferentes molaridades(0.5 M- 2.0 M) a temperatura de 450°C em escala laboratorial.



Fonte: O autor (2024)

**Tabela 13.** Capacidade antioxidante da fração aquosa de bio-óleos obtidos por pirólise de sementes de Açaí (*Euterpe oleracea*, Mart), ativada quimicamente com KOH 2.0 M com diferentes molaridades (0.5 M- 2.0 M) a 450°C em escala laboratorial.

Dilution	DPPH (μM/L)	
	0.5M	2.0 M KOH 1.0M
1:20	0.672	0.712
1:40	1.475	1.495
1:80	1.277	2.244
1:160	2.053	2.869
1:320	2.913	3.035
1:640	2.722	3.518

### 5.3. Avaliação da atividade antimicrobiana do bio-óleo

Nos últimos anos temos assistido ao emergir de espécies bacterianas com elevado grau de resistência à terapêutica convencional. Destacam-se *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli* (Fair e Tor, 2014; Monteiro et al., 2015).

#### 5.3.1. ATIVIDADE FRENTE À *Escherichia coli*

Os estudos da literatura têm indicado uma preocupação crescente com a resistência aos antibióticos entre as bactérias, especialmente em relação à *Escherichia coli*, uma das principais causadoras de infecções bacterianas em humanos, especialmente as infecções por bactérias Gram-negativas. Atualmente, destacam-se as estirpes que possuem Extended Spectrum  $\beta$ -lactamases (ESBLs), o que as torna resistentes às cefalosporinas de terceira geração. Além disso, essas bactérias têm demonstrado resistência a fluoroquinolonas e gentamicina (Monteiro et al., 2015). Diante desse cenário preocupante, foi avaliada a importância da possível atividade antimicrobiana do bio-óleo de sementes de açaí contra essa bactéria.

Com base nas informações sobre a cepa *Escherichia coli* - ATCC 25922, foram examinadas as diversas diluições do bio-óleo quanto à sua atividade antimicrobiana. Os resultados das concentrações mínimas inibitória (CIM) e bactericida (CBM) em relação às amostras de água de lavagem prévia ao processo de pirólise são apresentados na Tabela 14.

**Tabela 14 .** Concentrações mínimas inibitórias e bactericidas de água de lavagem da pirólise das sementes de açaí impregnadas com KOH frente a cepa *Escherichia coli*.

Nature	Pretreatment	Temperature	Code	MIC Value dilution factor	MBC Value dilution factor
Washing water	KOH (0.5M)	W/T	L1	>1:10	>1:10
Washing water	KOH (1.0M)	W/T	L2	1:40	1:40
Washing water	KOH (2.0M)	W/T	L3	1:40	1:40

**Fonte:** O autor (2024)

Observa-se na Tabela 14 que, nas amostras de água de lavagem (L1, L2 e L3), a menor concentração com efeito bacteriostático para impregnação com KOH a 0,5 M está dentro de uma faixa de diluição superior a 1:10. Este padrão difere para molaridades mais elevadas (1,0 M e 2,0 M), onde foram observadas diluições para MIC e MBC de 1:40 para ambas. Esses resultados indicam que o efeito bacteriostático das amostras de lavagem sobre a cepa de *Escherichia coli* aumenta com o aumento da molaridade utilizada no pré-tratamento químico da biomassa lignocelulósica das sementes de açaí. A consistência desses efeitos sugere que mesmo em concentrações mais diluídas, esses grupos mantiveram a capacidade bacteriostática.

Esses resultados estão em conformidade com os estudos de Valois et al. (2023) e Valdez et al. (2021), os quais indicam que as concentrações de hidrocarbonetos, como alcanos, alcenos, aromáticos e hidrocarbonetos cíclicos, aumentam com a molaridade seguindo um modelo exponencial de crescimento de primeira ordem. Em contrapartida, os compostos oxigenados, como álcoois, aminas, ácidos carboxílicos, fenóis, cetonas, furanos e outros, diminuem com a molaridade e aumento da diluição das amostras, conforme um modelo exponencial de decaimento de primeira ordem. Similarmente, o estudo de De Castro et al. (2019), que investigou a pirólise de sementes de açaí a 450°C e 1,0 atmosfera, ativadas com soluções de NaOH a 0,5 M, 1,0 M e 2,0 M em escala piloto, observou que molaridades mais elevadas de NaOH favoreceram a formação de hidrocarbonetos em detrimento dos compostos oxigenados.

A explicação para esses resultados encontra respaldo na literatura, como evidenciado pelo estudo de Beker et al. (2014), que investigou a atividade antimicrobiana de antioxidantes comerciais, como o butil-hidroxi-tolueno (BHT) e a terc-butil hidroquinona (TBHQ), além de um bio-óleo experimental em meio de cultura. Nesse estudo, o bio-óleo demonstrou atividade antimicrobiana na faixa de concentração de 0,25% a 4%, sendo que os menores valores de molaridade com impregnação de NaOH mostraram resultados mais significativos.

A temperatura não é uma variável considerada no processo das amostras de água de lavagem, uma vez que estas são coletadas durante o pré-tratamento químico dos resíduos de biomassa lignocelulósica. Portanto, essa variável é excluída da análise desses resultados.

A tabela 15 apresenta as diversas diluições de bio-óleo da semente de açaí (fase aquosa) avaliadas quanto à sua atividade antimicrobiana contra *Escherichia coli*, exibindo os resultados de Concentração Inibitória Mínima (CIM) e Concentração Bactericida Mínima (CBM).

**Tabela 15.** Concentrações mínimas inibitórias e bactericidas da fração aquosa do bio-óleo da pirólise das sementes de açaí impregnadas com KOH e HCL frente a cepa *Escherichia coli*.

Nature	Pretreatment	Temperature	Code	MIC Value dilution factor	MBC Value dilution factor
Aqueous Phase	KOH (0.5M)	450°C	HM1	>1:10	>1:10
Aqueous Phase	KOH (1.0M)	450°C	HM2	1:20	1:20
Aqueous Phase	KOH(2.0M)	450°C	HC3	1;40	1:40
Aqueous Phase	HCL (0.5M)	450°C	HM1	1:40	1:40
Aqueous Phase	HCL (1.0M)	450°C	HM2	1:40	1:40
Aqueous Phase	HCL (2.0M)	450°C	HC3	>1:40	>1:40

**Fonte:** O autor (2024)

Pode-se observar na análise das amostras da fração aquosa do bio-óleo, impregnadas com KOH a 450°C, que a menor concentração com efeito bacteriostático na impregnação com KOH a 0,5 M está dentro de uma faixa de diluição de 1:40. Esses resultados variam para molaridades mais altas (1,0 M e 2,0 M), onde foram observadas diluições para MIC e MBC de 1:20 e 1:10, respectivamente. Esses dados indicam que o efeito bacteriostático da fração aquosa do bio-óleo sobre a cepa de *Escherichia coli* diminui à medida que aumenta a molaridade utilizada no pré-tratamento químico da biomassa lignocelulósica das sementes de açaí. No entanto, mesmo com a redução dos compostos oxigenados, especialmente os fenólicos, nas amostras, os grupos mantiveram a capacidade bacteriostática devido ao aumento da molaridade a 450°C (Valois et al., 2023).

Estes resultados estão alinhados com a temperatura de 450°C, conforme demonstrado nos estudos de Valois et al., 2023, e Valdez et al., 2021, que indicam que a concentração de compostos oxigenados no bio-óleo, como fenóis, ésteres e cetonas, diminui com o aumento da temperatura de pirólise. Esse comportamento

segue um padrão de decaimento exponencial suave, o que contribui para a redução do efeito bacteriostático do bio-óleo da semente de açaí em altas temperaturas. Portanto, amostras mais diluídas não apresentam efeito bacteriostático significativo, uma vez que possuem um menor número de compostos fenólicos responsáveis por essa atividade.

Os resultados da atividade antimicrobiana dos bio-óleos de açaí são fundamentados pelos estudos de Beker et al., 2014; Mourant et al., 2005; Mazela, 2006; e Kim et al., 2012, que destacam a eficácia dos compostos fenólicos derivados da lignina como agentes antimicrobianos. Em várias investigações, o bio-óleo tem sido avaliado como um preservativo alternativo para madeira devido à sua capacidade de inibir o crescimento de micro-organismos deterioradores.

Trabalhos como os de Lay & Roy, 2004, e Xu et al., 2013, afirmam que os grupos hidroxila (-OH) dos compostos fenólicos são responsáveis por sua ação inibitória, pois podem interagir com a membrana celular e causar danos estruturais, resultando no extravasamento de componentes intracelulares. Esses grupos ativos são capazes de deslocar elétrons na membrana, atuando como trocadores de elétrons e reduzindo o gradiente de prótons através dela. Esse processo leva ao colapso da força próton-motriz, diminuindo a produção de ATP e, eventualmente, levando à morte celular. Da mesma forma, Farag et al., 1989, observaram que os grupos hidroxila podem ligar-se facilmente aos sítios ativos de enzimas, alterando o metabolismo celular dos micro-organismos. Esses modos de ação destacam a importância dos compostos fenólicos e seus grupos hidroxila na atividade antimicrobiana, oferecendo uma explicação para os resultados observados nos bio-óleos da semente de açaí.

A Tabela 16 apresenta as diversas diluições do bio-óleo da semente de açaí (fração orgânica) avaliadas quanto à sua atividade antimicrobiana contra *Escherichia coli*, exibindo os resultados de Concentração Inibitória Mínima (CIM) e Concentração Bactericida Mínima (CBM).

**Tabela 16.** Concentrações mínimas inibitórias e bactericidas da fração orgânica do bio-óleo da pirólise das sementes de açaí impregnadas com KOH frente a cepa *Escherichia coli*.

Nature	Pretreatment	Temperature	Code	MIC Value dilution factor	MBC Value dilution factor
Organic Phase	KOH (0.5M)	450°C	PM1	1:40	1:40
Organic Phase	KOH (1.0M)	450°C	PM2	1:80	1:80
Organic Phase	KOH (2.0M)	350°C	PT1	>1:40	>1:40
Organic Phase	KOH (2.0M)	400°C	PT2	1:80	1:80

**Fonte:** O autor (2024)

Os resultados das amostras de fração orgânica do bio-óleo, submetidas à impregnação com KOH em diferentes condições de temperatura (350°C, 400°C e 450°C) e molaridades (0.5 M, 1.0 M e 2.0 M), revelaram que a concentração com efeito bacteriostático na impregnação com KOH a 0.5 M está dentro de uma faixa de diluição de 1:80. No entanto, para molaridades mais elevadas (1.0 M e 2.0 M), os resultados mostraram valores de diluição diferentes para MIC (Concentração Inibitória Mínima) e MBC (Concentração Bactericida Mínima), sendo 1:40 e 1:80, respectivamente.

Esses achados indicam que o efeito bacteriostático da fração orgânica do bio-óleo, assim como da fração aquosa, em relação à cepa de *Escherichia coli*, aumenta conforme maior é a molaridade utilizada no pré-tratamento químico da biomassa lignocelulósica das sementes de açaí. Surpreendentemente, os resultados mostraram eficácia satisfatória mesmo em concentrações mais diluídas, mantendo a capacidade bacteriostática mesmo com a redução de compostos oxigenados, especialmente fenólicos, nas amostras, devido ao aumento da molaridade e temperatura durante o processo de pirólise da biomassa lignocelulósica (Valois et al., 2023; Valdez et al., 2021).

Vários estudos, como o de Chapman et al., 2003, e Beker et al., 2014, destacam que as diferenças nos revestimentos celulares de diferentes micro-organismos podem influenciar nos valores encontrados de CIM (Concentração Inibitória Mínima) e CBM (Concentração Bactericida Mínima). Os compostos fenólicos, conhecidos por

desestabilizarem a membrana citoplasmática dos micro-organismos, são encontrados em maior quantidade em amostras menos diluídas. Isso está em linha com o presente estudo, que indica que o bio-óleo apresenta valores de CIM mais baixos em amostras menos diluídas.

De maneira similar, no estudo de Rodrigues et al. (2020), o óleo essencial extraído da folha de capim-santo também apresentou atividade antimicrobiana contra *E. coli*. No entanto, a inibição ocorreu apenas nas três maiores concentrações das amostras testadas. Esse resultado pode ser correlacionado com achados anteriores, indicando que as amostras menos diluídas (maiores concentrações) tendem a apresentar atividade antimicrobiana dentro de uma faixa satisfatória de diluição. É notável que, conforme mencionado no presente estudo, concentrações mais diluídas (amostras menos concentradas) podem não alcançar uma Concentração Inibitória Mínima (CIM) satisfatória. Isso é atribuído à redução dos compostos fenólicos e outros componentes bioativos em ambientes diluídos, afetando a eficácia antimicrobiana dos óleos essenciais.

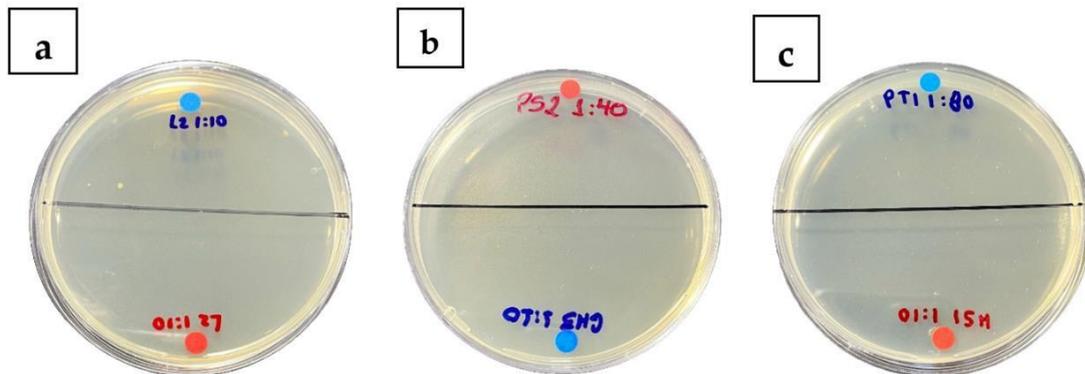
No estudo de Contrucci et al. (2019), foi realizada uma avaliação da atividade antibacteriana de diferentes óleos essenciais e amêndoas contra a bactéria *E. coli*. Os resultados mostraram que todos os óleos essenciais testados apresentaram bioatividade em concentrações superiores à CIM (Concentração Inibitória Mínima) e CBM (Concentração Bactericida Mínima), enquanto foram ineficazes em concentrações inferiores a essas.

Esses achados são consistentes com o estudo de Monteiro et al. (2015), que também investigou a atividade antimicrobiana de diversos óleos essenciais contra a cepa de *E. coli*. Neste estudo, observou-se que os óleos essenciais foram capazes de induzir suscetibilidade significativa à ação antimicrobiana, com valores de CMI (Concentração Mínima Inibitória) de 8,0 µL/ml. Esses resultados destacam que a eficácia dos óleos essenciais contra *E. coli* está diretamente relacionada à concentração utilizada. Concentrações adequadas são necessárias para alcançar efeitos antimicrobianos eficazes, enquanto concentrações mais baixas podem não ser suficientes para inibir o crescimento bacteriano.

A Figura 35 mostra os resultados das concentrações bactericidas mínimas (CBM) das amostras de água de lavagem de açai, fração aquosa e fração orgânica do bio-

óleo em relação à cepa *Escherichia coli*. Observa-se na imagem que não houve crescimento bacteriano nas faixas estabelecidas nos resultados deste estudo.

**Figura 35.** Concentração bactericida mínima (CBM): a) correspondente a água de lavagem; b) Fração aquosa; c) Fração orgânica; frente à cepa de *Escherichia coli*.



**Fonte:** O autor (2024)

### 5.3.2. ATIVIDADE FRENTE À *Staphylococcus aureus*

Encontra-se na literatura estudos que evidenciam que as bactérias Gram – positivas constituem uma grande ameaça para o Homem com o aparecimento de estirpes de *Staphylococcus aureus* resistentes à meticilina (MRSA) e mais tarde à vancomicina (VRSA). Esta bactéria faz parte da flora comensal do Homem, mas pode causar severos problemas como infeções na pele e pneumonias. Face ao aparecimento dos MRSA, os glicopeptídeos vancomicina e teicoplanina foram selecionados como alternativa terapêutica. No entanto começam a surgir resistências também a estes antibióticos (Monteiro et al., 2015; Fair e Tor, 2014; Dj Den Heijer, et al., 2013). Sendo de extrema importância, procurar novos compostos antimicrobianos para sanar esse problema de saúde pública.

Diante disso, o presente trabalho avaliou a capacidade antimicrobiana do bio-óleo de semente de açaí com diferentes temperaturas e molaridades frente à cepa de *Staphylococcus aureus*- ATCC 29213. As diferentes diluições de bio-óleo foram avaliadas quanto a sua atividade antimicrobiana e os resultados de concentração

inibitória e biocida mínima (CIM/CBM) com relação as amostras de água de lavagem anterior ao processo de pirólise das sementes do açaí encontram-se na tabela 17.

**Tabela 17.** Concentrações mínimas inibitórias e bactericidas de água de lavagem da pirólise das sementes de açaí impregnadas com KOH frente a cepa *Staphylococcus aureus*.

Nature	Pretreatment	Temperature	Code	MIC Value dilution factor	MBC Value dilution factor
Washing water	KOH (0.5M)	W/T	L1	1:5	1:20
Washing water	KOH (1.0M)	W/T	L2	>1:10	1:40
Washing water	KOH(2.0M)	W/T	L3	>1:10	1:40

Fonte: O autor (2024)

Com base nos resultados obtidos descritos na tabela 17 pode-se constatar que tanto a concentração mínima inibitória e a concentração bactericida mínima para impregnação com KOH a 0.5 M está dentro de uma faixa de diluição para valores de 1:5 e 1:20 respectivamente, resultados que diferem para molaridades maiores (1.0 M e 2.0 M), onde apresentaram valores de diluição para MIC e MBC de >1:10 e 1:40 respectivamente. Como discutido anteriormente na secção 5.3.1 a temperatura é uma variável ausente, pois as amostras correspondentes a água de lavagem não passaram pelo processo de pirólise a altas temperaturas. Estes resultados permitem afirmar que o presente estudo da atividade antimicrobiana das amostras de lavagem para a cepa de *Staphylococcus aureus*, apresenta valores baixos de CIM o que indica alta atividade antimicrobiana com diluições maiores que 1:5 (Amostras mais concentradas) de acordo com a diminuição de molaridade de tratamento com KOH.

Esses resultados são coerentes com os trabalhos de De Castro et al (2019) ,Valois et al.,(2023) e Beker et al.,(2014), onde fizeram estudos do bio-óleo de resíduos de biomassa lignocelulósica pirolisada a diferentes temperaturas e molaridades e observaram que maiores molaridades de impregnação química da solução de NaOH e KOH favoreceram a formação de hidrocarbonetos em detrimento de compostos oxigenados. Esses estudos têm relação direta com o trabalho de Cataluna et al., (2013) onde constatou que os compostos fenólicos que fazem parte dos compostos oxigenados causam ação inibitória a diferentes microrganismos, uma vez que esses grupos podem interagir com a membrana celular e romper as estruturas dela

causando o extravasamento de componentes intracelulares. Além de possuírem atividades antivirais, antissépticas e antimicrobianas.

Os valores da Concentração Inibitória Mínima (CIM) e Concentração Bactericida Mínima (CBM) dos produtos de diferentes diluições de bio-óleo de semente de açaí (Fase aquosa) testados sobre a cepa de *S. aureus* estão apresentados, na tabela 18.

**Tabela 18.** Concentrações mínimas inibitórias e bactericidas da fração aquosa do bio-óleo da pirólise das sementes de açaí impregnadas com KOH frente a cepa de *Staphylococcus aureus*.

Nature	Pretreatment	Temperature	Code	MIC Value dilution factor	MBC Value dilution factor
Aqueous Phase	KOH (2.0M)	350°C	C.N/A	1:40	1:40
Aqueous Phase	KOH (2.0M)	400°C	C.B	>1:40	>1:40
Aqueous Phase	KOH(2.0M)	450°C	C.A	>1:40	>1:40

**Fonte:** O autor (2024)

Com base nos dados da tabela 18, é possível observar na impregnação com KOH com valores de molaridade constante equivalente a 2.0M e temperaturas variáveis (350°C, 400°C e 450°C) que tanto a concentração mínima inibitória como a concentração bactericida estão dentro de uma faixa de diluição de 1:4. As molaridades não afetaram os resultados das amostras de fração aquosa em decorrência de serem constantes e equivalentes a 2.0M. Sendo a temperatura a variável determinante na concentração de compostos presentes nas amostras.

Esses resultados apontam que a atividade antimicrobiana da fração aquosa do bio-óleo para a cepa de *Staphylococcus aureus* diminui quanto maior for a temperatura utilizada no pré-tratamento químico da biomassa lignocelulósica das sementes de açaí. O que pode ser justificado por uma diminuição de compostos oxigenados especificamente os fenólicos nas amostras, causado pelo aumento da temperatura no processo pirolítico e conseqüentemente diminuição de inibição de crescimento bacteriano. Estes dados estão de acordo com os estudos de Rocha et al., (2021) e De Sousa et al., (2021) onde as concentrações de cresóis, fenóis, e cetonas diminuem com o aumento da temperatura de pirólise devido às reações de

desoxigenação convertendo fenóis, ésteres e cetonas em hidrocarbonetos, monóxido de carbono, dióxido de carbono e água (descarboxilação e descarbonilação).

Os resultados referentes das amostras de fração orgânica do bio-óleo podem ser vistos na tabela 19. Os dados de impregnação com HCL a diferentes temperaturas (400°C e 450°C) e molaridades constantes equivalentes a 2.0 M. A molaridade não alterou os resultados, pois é constante para as amostras. O fator determinante é a variável temperatura, onde nas amostras a 450°C os valores de CIM e CBM foram apresentados em diluições maiores, ou seja, em amostras menos concentradas. Como foi discutido anteriormente, o aumento da temperatura ocasiona a diminuição de compostos oxigenados e conseqüentemente diminuição na capacidade antimicrobiana das amostras. Dados que são coerentes com os trabalhos de Sienkiewicz et al (2014) e Yap et al., (2014) onde afirmam que os óleos devem ser utilizados em formas diluídas, especialmente quando aplicados diretamente a pele, sendo tão eficazes quanto os agentes antibacterianos químicos. Além disso, é importante que os micro-organismos não adquiram resistência aos óleos essenciais ou aos seus componentes.

**Tabela 19.** Concentrações mínimas inibitórias e bactericidas da fração orgânica do bio-óleo da pirólise das sementes de açaí impregnadas com KOH frente a cepa *Staphylococcus aureus* .

Nature	Pretreatment	Temperature	Code	MIC Value dilution factor	MBC Value dilution factor
Organic Phase	HCL (2.0M)	400°C	PLO/B	1:5	1:40
Organic Phase	HCL(2.0M)	450°C	PLO/A	>1:5	>1:40

**Fonte:** O autor (2024)

Esses dados são compatíveis com o estudo de Rodrigues et al., (2020) onde O óleo essencial extraído da folha de capim-santo apresentou atividade antimicrobiana frente à *S. aureus*, sendo que foi possível identificar uma maior eficácia do OE quando testado frente ao *S. aureus*, uma vez que houve formação de halo com diâmetro significativo em todas as concentrações e o disco embebido com o óleo na concentração 100% apresentaram halo de tamanho superior ao do antimicrobiano industrializado. Assim como o trabalho de Silva et al., (2014) onde seu estudo sobre a atividade antimicrobiana do OE de *Cymbopogon citratus*, permitiu afirmar que o OE do capim-santo possui atividade antimicrobiana frente a *S. aureus*.

O estudo de Saviuc et al., (2016) afirma que os mecanismos de ação dos compostos naturais sobre as bactérias estão relacionados à desintegração da membrana citoplasmática, desestabilização da força motora do próton (PMF), fluxo de elétrons, transporte ativo e coagulação do conteúdo celular. Nem todos os mecanismos de ação incidem em alvos específicos, e alguns sítios podem ser afetados em função de outros mecanismos ainda não determinados.

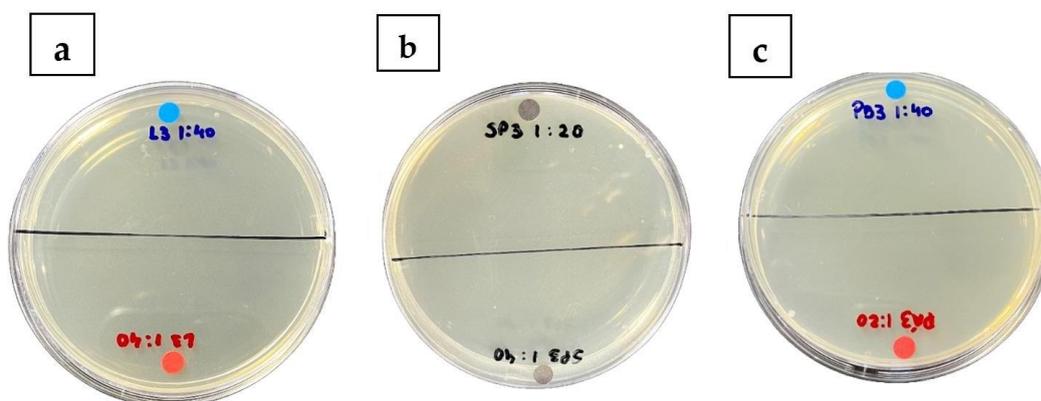
Conforme discutido e apresentado no estudo de Freire et al., (2014) os valores de CIM e CBM verificados demonstraram que os produtos naturais avaliados apresentam propriedades biológicas ativas frente a inibição *S. mutans* e *S. aureus*. Esses dados corroboram também com o trabalho de Costa et al (2009) em que avaliaram a ação antimicrobiana do óleo essencial de *Ocimum basilicum*, o qual mostrou-se ativo sobre cepas bacterianas incluindo *S. aureus* até a concentração de 2%. Verificou-se atividade bactericida e bacteriostática do óleo.

No estudo de Ferez et al (2014), *S. aureus* foi sensível a todos os óleos essenciais trabalhados na pesquisa, sendo que a menor concentração em que houve formação de halos inibitórios foi 12,5%, do óleo essencial de *Cymbopogon flexuosus*. Esse estudo permitiu concluir que os óleos essenciais apresentaram atividade biológica contra *S. aureus*, em especial o óleo de *C. flexuosus*, demonstrando ser antimicrobiano potencial contra essa bactéria.

Na literatura, o estudo de Mashiba et al.,(2019), é coerente com os resultados do presente trabalho. A pesquisa avaliou a atividade antioxidante e antimicrobiana das frações da lignina pirolítica. A ação antimicrobiana das amostras apontou resultados similares que foram capazes de inibir o crescimento tanto da *E. coli* quanto da *S. aureus*. A lignina pirolítica indica ter propriedades antioxidantes e antimicrobianas, sendo um material promissor para uso em embalagens inteligentes e produtos farmacêuticos.

A figura 36 mostra os resultados das concentrações bactericidas mínimas (CBM) das amostras de água de lavagem de açaí, fração aquosa e fração orgânica do bio-óleo em relação à cepa *Staphylococcus aureus*. Na imagem, observa-se que não houve crescimento bacteriano nas áreas determinadas pelos resultados deste estudo.

**Figura 36.** Concentração bactericida mínima (CBM): a) correspondente a água de lavagem; b) Fração aquosa; c) Fração orgânica; frente à cepa de *Staphylococcus aureus*



Fonte: O autor (2024)

#### 5.4. Ensaio de viabilidade celular

Os resíduos dos caroços de açaí e tucumã são ricos em lignina, celulose e hemicelulose, substâncias valiosas para processos de transformação térmica visando a produção de bio-óleo através da pirólise. Além disso, esses resíduos são fontes de compostos bioativos. O bio-óleo resultante desses processos inclui uma mistura de compostos oxigenados e fenólicos, conforme discutido por Souza et al. (2021). Esses compostos possuem diversas propriedades biológicas, como antioxidantes (Deus et al., 2019), atividade antimicrobiana (Arbos et al., 2013) e capacidade de modular o sistema imunológico (Santos, 2021).

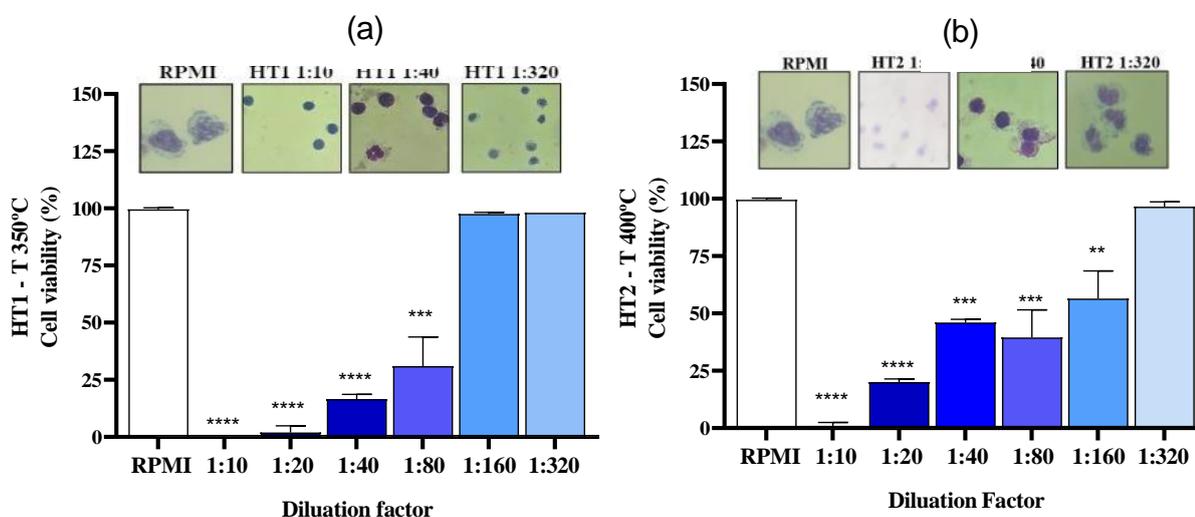
No início do processo, investigou-se a viabilidade celular da fração aquosa da pirólise impregnada com ácido clorídrico 2,0M em diferentes temperaturas: 350°C (HT1), 400°C (HT2) e 450°C (HC3). Aumentar a temperatura de pirólise reduziu a viabilidade celular em diluições 1:160 (HT1, 97,5±0,7%; HT2, 56,5±12,0%; HC3, 8,5±0,7%), mas melhorou significativamente em diluições 1:320 (HT1, 98±0%; HT2, 96,5±2,1%; HC3, 71,5±9,2%). Estudos anteriores mostram que a acidez da fração aquosa impregnada aumenta com a temperatura de pirólise devido à presença de ácidos carboxílicos e fenóis (Valdez et al., 2023).

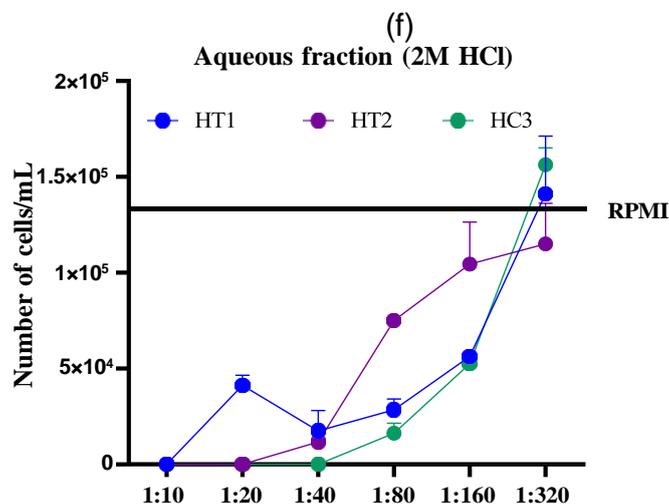
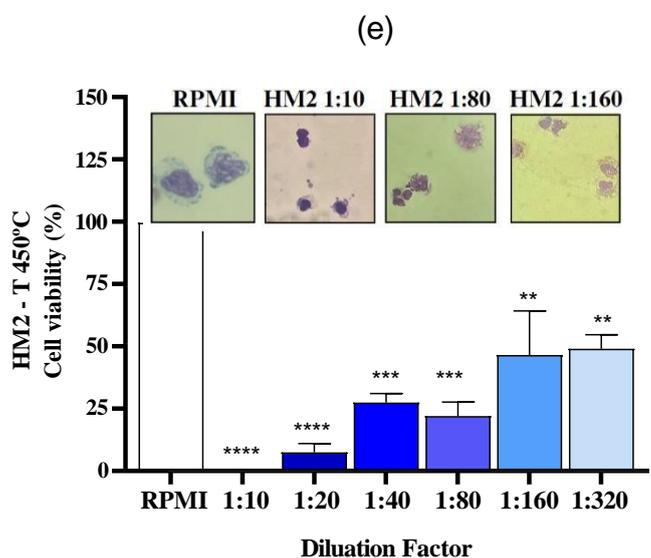
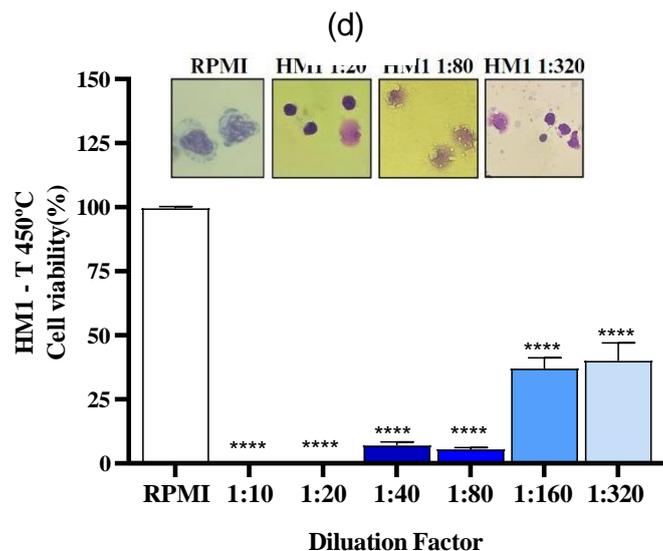
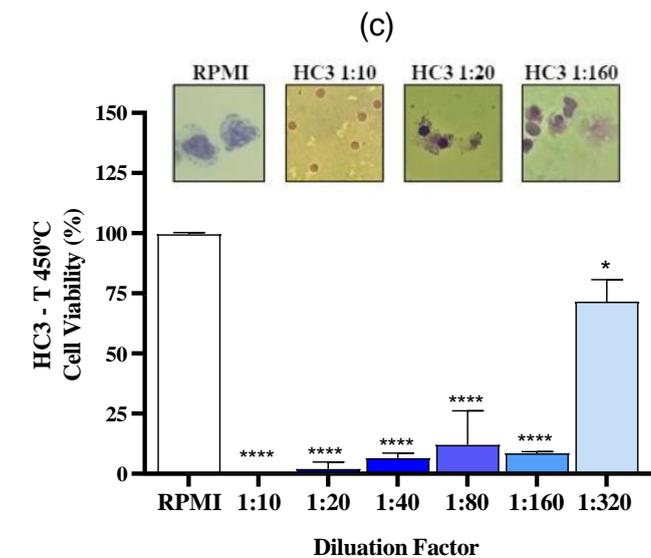
Em concentrações mais baixas de impregnação ácida (0,5M-HM1; 1,0M-HM2) e a uma temperatura de pirólise de 450°C, foi observado um efeito citotóxico nas diluições testadas, resultando em uma redução tanto no número quanto na aparência das células viáveis, em comparação com a concentração de 2,0M de HCl na mesma temperatura (Figura 37.D e E). Este achado sugere que tanto a temperatura quanto a concentração de ácido clorídrico influenciam significativamente os componentes presentes nas frações aquosas obtidas da pirólise do açúcar.

A avaliação da qualidade dos óleos frequentemente considera o índice de acidez, que reflete a quantidade de base necessária para neutralizar os ácidos graxos livres presentes (Pereira et al., 2021). Esse índice pode aumentar devido à hidrólise dos triacilgliceróis, um processo que pode ser acelerado pelo calor e pela exposição à luz (Castro et al., 2021). Altos níveis de ácidos graxos livres, e conseqüentemente um elevado índice de acidez, têm potencial para comprometer as propriedades biológicas do composto final (Pereira et al., 2021).

Dentro desse contexto, a impregnação química contribui para a formação de oxigenados, enquanto o aumento da temperatura é responsável pela formação de ácidos graxos livres, que podem aumentar a citotoxicidade da amostra devido à formação de compostos tóxicos e ao aumento do índice de acidez.

**Figura 37. Viabilidade celular em percentagem de PBMC após incubação com as frações aquosas impregnadas com HCl ou não em diferentes temperaturas e diluições.** (a) Fração aquosa impregnada com 2,0M de HCl sob 350°C (b) Fração aquosa impregnada com 2,0M de HCl sob 400°C (C) Fração aquosa impregnada com 2,0M de HCl sob 450°C (d) Fração aquosa impregnada com 0,50M de HCl sob 450°C (e) Fração aquosa impregnada com 1,0M de HCl sob 450°C (f) Número de células/mL nas frações aquosas HT1, HT2 e HC3. \*  $p \leq 0.05$  \*\*  $p < 0.01$  \*\*\*  $p < 0.00001$



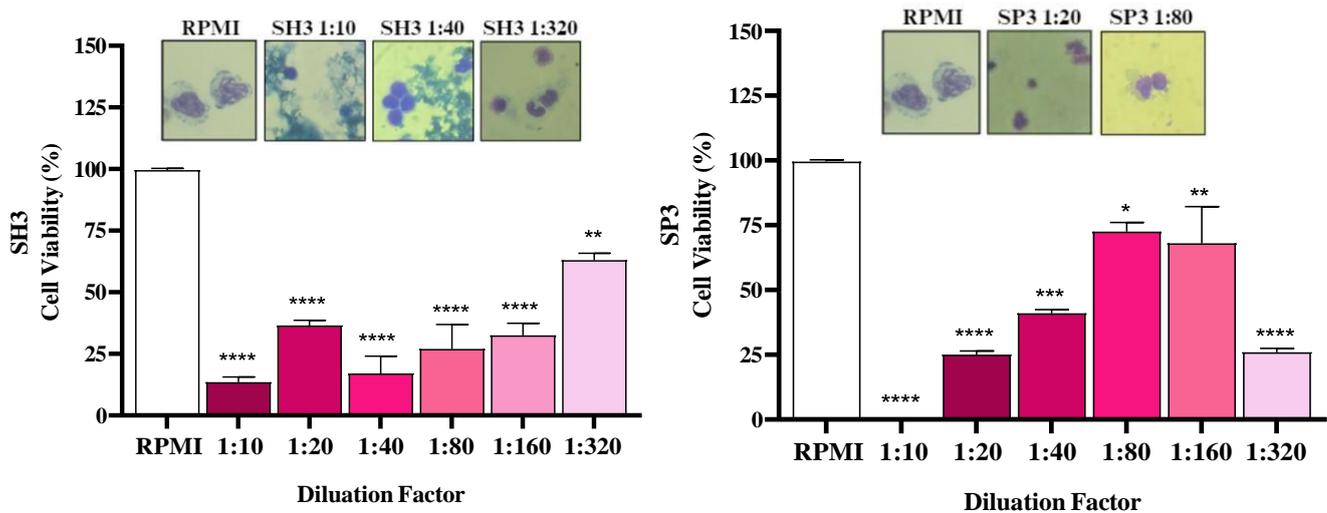


Os resultados da solução aquosa não tratada a 450°C (Figura 39.A) demonstraram um menor impacto na viabilidade celular em comparação com as amostras HM1 e HM2 diluídas a 1:320 (63±2,8%), conforme discutido anteriormente. Contudo, ainda foi observada uma redução na sobrevivência das células.

A fração orgânica não tratada (SP3) a 450°C apresentou menor toxicidade celular nas diluições de 1:80 (72,51±3,5%) e 1:160 (68±14,1%) (Figura 38.B). No entanto, houve uma diminuição na viabilidade celular em comparação com a amostra HT1, evidenciando que a temperatura exerce influência sobre os compostos extraídos durante a pirólise, como discutido anteriormente.

Os achados observados decorrem da composição dos subprodutos da pirólise quando não são submetidos a tratamentos ácidos ou básicos. Nessas circunstâncias, os líquidos resultantes da pirólise podem conter principalmente hidrocarbonetos, como apontado por Souza et al. (2021).

**Figura 38.** Viabilidade celular em porcentagem de PBMC após incubação com a fração orgânica não impregnada, obtida via pirólise a 450°C.



Fonte: O autor (2024)

Estudos revelam que os mecanismos de decomposição dos componentes da biomassa de açaí variam conforme a temperatura de pirólise: a hemicelulose se decompõe entre 220 e 315 °C, a celulose entre 315 e 400 °C, e a lignina entre 300 e 550 °C (Santos, 2022). Portanto, pode-se deduzir que o bio-óleo produzido a 450 °C sem tratamento consiste principalmente em componentes derivados da lignina, enquanto amostras pirolisadas a temperaturas inferiores a 400 °C contêm uma proporção significativa de compostos resultantes da decomposição da hemicelulose e celulose durante o processo.

Além disso, de acordo com o estudo de De Castro et al (2019), a hemicelulose e a lignina têm uma alta capacidade de se solubilizar em meios ácidos, o que torna o pré-tratamento químico um fator significativamente influente na composição química dos produtos do processamento pirolítico dessa biomassa. Durante o pré-tratamento, a solubilização da hemicelulose e da lignina resulta na diminuição da formação de

alguns ácidos orgânicos durante a pirólise do material, reduzindo assim a quantidade de compostos oxigenados no bio-óleo (De Castro et al., 2019).

Na literatura, alguns hidrocarbonetos são descritos como prejudiciais à saúde, pois podem ser facilmente absorvidos pelas células devido à composição majoritária das membranas biológicas ser lipídica, aumentando o risco de interação com o DNA, o que pode causar danos ou até mesmo a destruição das células (Silva et al., 2013). Nesse sentido, pode-se deduzir que a solução ácida mais concentrada (2M) facilitou a remoção de certos compostos da estrutura da biomassa, os quais poderiam ser decompostos durante a pirólise e, conseqüentemente, aumentar o efeito citotóxico da amostra, como observado nas amostras sem tratamento.

## 6. CONCLUSÕES

A pesquisa revelou que tanto a fração aquosa quanto o bio-óleo apresentaram atividade significativa contra as cepas testadas, especialmente na diluição 1:40, indicando a eficácia dos compostos fenólicos e oxigenados presentes, mesmo em concentrações baixas. A fração orgânica do açaí demonstrou elevada atividade antioxidante devido ao seu alto teor de compostos fenólicos, independentemente da diluição. Concentrações menores de HCl a 450°C mostraram causar citotoxicidade, afetando a quantidade e morfologia celular, evidenciando que temperatura e acidez influenciam negativamente as frações aquosas da pirólise do açaí. Apesar disso, o açaí apresentou um potencial promissor para testes futuros de atividade antioxidante e antimicrobiana em diluições com menor citotoxicidade.

## 7. REFERÊNCIAS

CEDRIM, Paula Cavalcante Amélio Silva; BARROS, Elenita Marinho Albuquerque; NASCIMENTO, Ticiano Gomes do. Propriedades antioxidantes do açaí (*Euterpe oleracea*) na síndrome metabólica. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 21, p. e2017092, 2018.

BONOMO, L. F.; SILVA, D. N.; BOASQUIVIS, P. F.; PAIVA, F. A.; GUERRA, J. F.; MARTINS, T. A.; TORRES, Á. G. J.; PAULA, I. T.; CANESCHI, W. L.; JACOLOT, P.; GROSSIN, N.; TESSIER, F. J.; BOULANGER, E.; SILVA, M. E.; PEDROSA, M. L.; OLIVEIRA, R. P. Açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) modulates oxidative stress resistance in *Caenorhabditis elegans* by direct and indirect mechanisms. *PLoS One*, v. 9, n. 3, p. e89933, 2014. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0089933>. PMID:24594796

BERNAUD, R. F. S.; FUNCHAL, C. D. S. Atividade antioxidante do açaí. *Nutrição Brasil*, v. 10, n. 5, p. 310-316, 2011

MENEZES, E. M. S.; TORRES, A. T.; SRUR, A. U. S. Valor nutricional da polpa de açaí (*Euterpe oleracea* Mart) liofilizada. *Acta Amazonica*, v. 38, n. 2, p. 311-316, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672008000200014>

DARNET, S.; SERRA, J. L.; RODRIGUES, A. M. C.; SILVA, L. H. M. A high-performance liquid chromatography method to measure tocopherols in assai pulp (*Euterpe oleracea*). *Food Research International*, v. 44, n. 7, p. 2107-2111, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.039>

ROGEZ, H.; POMPEU, D. R.; AKWIE, S. N. T.; LARONDELLE, Y. Sigmoidal kinetics of anthocyanin accumulation during fruit ripening: a comparison between açaí fruits (*Euterpe oleracea*) and other anthocyanin-rich fruits. *Journal of Food Composition and Analysis*, v. 24, n. 6, p. 796-800, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfca.2011.03.015>

YAMAGUCHI, K. K. L.; PEREIRA, L. F.; LAMARÃO, C. V.; LIMA, E. S.; VEIGA-JUNIOR, V. F. Amazon acai: chemistry and biological activities: a review. *Food Chemistry*, v. 179, p. 137-151, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.055>. PMID:25722148

Felipe Fernando da Costa Tavares, Marcos Danilo Costa de Almeida, João Antonio Pessoa da Silva, Ludmila Leite Araújo, Nilo Sérgio Medeiros Cardozo and Ruth Marlene Campomanes Santana. Thermal treatment of açaí (*Euterpe oleracea*) fiber for com- 711 posite reinforcement. *Polímeros*, 30(1), e2020003, 2020, <https://doi.org/10.1590/0104-1428.09819>

VALOIS, Flávio Pinheiro et al. Improving the Antioxidant Activity, Yield and Hydrocarbon Content of Bio-Oil from Açaí Seeds Pyrolysis by Chemical Activation: Effect of Temperature and Molarity. 2023.

KANG, J.; LI, Z.; WU, T.; JENSEN, G. S.; SCHAUSS, A. G.; WU, X. Anti-oxidant capacities of flavonoid compounds isolated from acai pulp (*Euterpe oleracea* Mart.). *Food Chemistry*, v. 122, n. 3, p. 610-617, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.03.020>

BARBOSA, Andrezza de Melo et al. Caracterização de partículas de açaí visando seu potencial uso na construção civil. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 24, p. e12435, 2019.

LAHR, F. A. R., SAVASTANO JUNIOR, H., FIORELLI, J. (Org.), “Use of amazon vegetable fibers’ waste and woods for the production of polymeric composites”, In: *Non-conventional Building Materials based on agroindustrial wastes*, São Paulo, pp. 313-328, 2015.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2014), *Produção da extração vegetal e silvicultura*, v. 29, Rio de Janeiro.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2017), *Produção da extração vegetal e silvicultura - PEVS*, Rio de Janeiro

TAVARES, Felipe Fernando da Costa. *Influência do tratamento térmico em fibras das sementes de açaí e do uso de agentes de acoplamento de fonte natural em compósito de polipropileno*. 2020.

POMPEU, D. R.; SILVA, E. M.; ROGEZ, H. J. B. T. Optimisation of the solvent extraction of phenolic antioxidants from fruits of *Euterpe oleracea* using Response Surface Methodology. *Bioresource technology*, v. 100, n. 23, p. 6076-6082, 2009.

SATO, Michel Keisuke et al. *Biocarvão de resíduos de açaí como condicionante de solos*. 2018.

Sabbe, S.; Verbeke, W.; Deliza, R.; Matta, V.; Van Damme, P. Effect of a health claim and personal characteristics on consumer acceptance of fruit juices with different concentrations of açaí (*Euterpe oleracea* Mart.). *Appetite* 2009, 53, 84–92. [CrossRef] [PubMed]

DE CASTRO, D.A.R. *Processo de Produção de Bio-Óleo e Bio-Adsorventes via Pirólise das Sementes do Açaí (Euterpe oleraceae, Mart)*. Ph.D. Thesis, PRODERNA, UFPa, Belém, Brazil, 2019.

SERRÃO, A. C. M. et al. Process analysis of pyrolysis of Açaí (*Euterpe Oleracea*, Mart) seeds: Influence of temperature on the yield of reaction products and physico-chemical properties of Bio-Oil. *Braz. J. Dev*, v. 7, p. 18200-18220, 2021.

Piyali Das; Anuradda Ganesh. Bio-oil from pyrolysis of cashew nut shell—a near fuel. *Biomass and Bioenergy*, Volume 25, Issue 1, July 2003, 113-117

Ayşe E. Pütün; EsinApaydın; Ersan Pütün. Rice straw as a bio-oil source via pyrolysis and steam pyrolysis. *Energy*, Volume 29, Issues 12–15, October–December 2004, 2171-2180

Zhang Qi; Chang Jie; Wang Tiejun; Xu Ying. Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. *Energy Conversion and Management* 48 (2007) 87-92

W.T.Tsaia; M. K. Lee; Y. M. Chang. Fast pyrolysis of rice husk: Product yields and compositions. *Bioresource Technology*, Volume 98, Issue 1, January 2007, 22-28

Gaurav Kumar; Achyut K. Panda; R. K. Singh. Optimization of process for the production of bio-oil from eucalyptus wood. *J Fuel Chem Technol*, 2010, 38(2), 162-167

Hyeon Su Heo; Hyun Ju Park; Jong-In Dong; Sung Hoon Park; Seungdo Kim; Dong Jin Suh; Young-Woong Suh; Seung-Soo Kim; Young-Kwon Park. Fast pyrolysis of rice husk under different reaction conditions. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Volume 16, Issue 1, 25 January 2010, 27-31

Rajeev Sharma; Pratik N. Sheth. Thermo-Chemical Conversion of Jatropha Deoiled Cake: Pyrolysis vs. Gasification. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, Vol. 6, No. 5, October 2015

Yining Sun; Bin Gao; YingYao; June Fang; Ming Zhang; Yanmei Zhou; Hao Chen; Liuyan Yang. Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties. *Chemical Engineering Journal* 240 (2014) 574-578

D. A. R. de Castro; H. J. da Silva Ribeiro; C. C. Ferreira; L. H. H. Guerreiro; M. de Andrade Cordeiro; A. M. Pereira; W. G. dos Santos; F. B. de Carvalho; J. O. C. Silva Jr.; R. Lopes e Oliveira; M. C. Santos; S. Duvoisin Jr; L. E. P. Borges; N. T. Machado. Fractional Distillation of Bio-Oil Produced by Pyrolysis of Açai (*Euterpe oleracea*) Seeds. Editor Hassan Al-Haj Ibrahim: Fractionation, Intechopen ISBN: 978-1-78984-965-3, DOI: 10.5772/intechopen.79546

DANIEL VALDEZ, Géron et al. Improving the Bio-Oil Quality of Residual Biomass Pyrolysis by Chemical Activation: Effect of Alkalis and Acid Pre-Treatment. *Energies*, v. 16, n. 7, p. 3162, 2023.

Bufalino, L.; Guimaraes, A.A.; de Silva, B.M.; de Souza, R.L.F.; de Melo, I.C.N.A.; de Oliveira, D.N.P.S.; Trugilho, P.F. Local variability of yield and physical properties of açai waste and improvement of its energetic attributes by separation of lignocellulosic fibers and seeds. *J. Renew. Sustain. Energy* 2018, 10, 053102. [CrossR

Guerreiro, L.H.H.; Baia, A.C.F.; Assunção, F.P.D.C.; Rodrigues, G.D.O.; e Oliveira, R.L.; Junior, S.D.; Pereira, A.M.; de Sousa, E.M.P.; Machado, N.T.; de Castro, D.A.R.; et al. Investigation of the Adsorption Process of Biochar Açai (*Euterpe oleracea* Mart.) Seeds Produced by Pyrolysis. *Energies* 2022, 15, 6234. [CrossRef]

Sato, M.K.; de Lima, H.V.; Costa, A.N.; Rodrigues, S.; Pedroso, A.J.S.; de Freitas Maia, C.M.B. Biochar from Acai agroindustry waste: Study of pyrolysis conditions. *Waste Manag.* 2019, 96, 158–167. [CrossRef]

Pessôa, T.S.; Ferreira, L.E.D.L.; da Silva, M.P.; Neto, L.M.P.; Nascimento, B.F.D.; Fraga, T.J.M.; Jaguaribe, E.F.; Cavalcanti, J.V.; Sobrinho, M.A.D.M. Açai waste benefiting by gasification process and its employment in the treatment of synthetic and raw textile wastewater. *J. Clean. Prod.* 2019, 240, 118047. [CrossRef]

Nascimento, B.F.D.; de Araujo, C.M.B.; Nascimento, A.C.D.; da Silva, F.L.H.; de Melo, D.J.N.; Jaguaribe, E.F.; Cavalcanti, J.V.F.L.; Sobrinho, M.A.D.M. Detoxification of sisal

bagasse hydrolysate using activated carbon produced from the gasification of açai waste. *J. Hazard. Mater.* 2020, 409, 124494. [CrossRef] [PubMed]

CHANDRASEKARAN, Sriraam R. et al. Antioxidants from slow pyrolysis bio-oil of birch wood: Application for biodiesel and biobased lubricants. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 4, n. 3, p. 1414-1421, 2016.

VELASQUE, Leandra Fiori Lopes; LOBO, Ana Carolina Martini. Revisão de literatura sobre os efeitos terapêuticos do açai e sua importância na alimentação. *Biosaúde*, v. 18, n. 2, p. 97-106, 2016.

Santos GM. et al. Correlação entre atividade antioxidante e compostos bioativos de polpas comerciais de açai (*Euterpe oleracea* Mart). *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, Caracas, v.58, n.2, p.187-192, 2008

.Menezes SEM, Torres AT, Srur AUS. Valor nutricional da polpa de açai (*Euterpe oleracea* Mart.). *Revista Acta Amazonica*, v. 38, p.311-316, 2008

PATRA, Jayanta Kumar et al. Volatile compounds and antioxidant capacity of the bio-oil obtained by pyrolysis of Japanese red pine (*pinus densiflora* siebold and zucc.). *Molecules*, v. 20, n. 3, p. 3986-4006, 2015.

Bedmutha, R.; Booker, C.J.; Ferrante, L.; Briens, C.; Berruti, F.; Yeung, K.K.C.; Scott, I.; Conn, K. Insecticidal and bactericida characteristics of the bio-oil from the fast pyrolysis of coffee grounds. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 2011, 90, 224–231

HOSSAIN, Mohammad M. et al. Application of novel pyrolysis reactor technology to concentrate bio-oil components with antioxidant activity from tobacco, tomato and coffee ground biomass. *Waste and biomass valorization*, v. 9, p. 1607-1617, 2018.

DE SOUZA SILVA, Anna Paula et al. Phenolic Profile and the Antioxidant, Anti-Inflammatory, and Antimicrobial Properties of Açai (*Euterpe oleracea*) Meal: A Prospective Study. *Foods*, v. 12, n. 1, p. 86, 2022.

Chen, S.; Zhou, H.; Zhang, G.; Meng, J.; Deng, K.; Zhou, W.; Wang, H.; Wang, Z.; Hu, N.; Suo, Y. Anthocyanins from *Lycium ruthenicum* Murr. Ameliorated d-galactose-induced memory impairment, oxidative stress, and neuroinflammation in adult rats. *J. Agric. Food Chem.* 2019, 67, 3140–3149

Del Pozo-Insfran, D., Brenes, C.H., Talcott, S.T., 2004. Phytochemical composition and pigment stability of acai (*Euterpe oleracea* Mart). *J. Agr. Food Chem.* 52, 1539–1545

DIAS FILHO, Dário Gomes et al. Revisão de literatura sobre a atividade antioxidante do açai. *Revista Contemporânea*, v. 3, n. 1, p. 240-248, 2023.

MARTINS, Gabriel R. et al. Chemical characterization, antioxidant and antimicrobial activities of açai seed (*Euterpe oleracea* Mart.) extracts containing A-and B-type procyanidins. *Lwt*, v. 132, p. 109830, 2020.

ABE SATO, Suenne Taynah et al. Isolation and genetic identification of endophytic lactic acid bacteria from the Amazonian açai fruits: Probiotics features of selected

strains and their potential to inhibit pathogens. *Frontiers in microbiology*, v. 11, p. 610524, 2021.

KUSKOSKI, E. M.; FETT, P.; ASUERO, A. G. Antocianos: un grupo de pigmentos naturales. Aislamiento, identificación y propiedades. *Alimentaria*, v. 2, n. 61, p. 61-74, 2002

ALASALVAR, C.; AL-FARSI, M.; QUANTICK, P. C.; SHAHIDI, F.; WIKTOROWICZ, R. Effect of chill storage and modified atmosphere packaging (MAP) on antioxidant activity, anthocyanins, carotenoids, phenolics and sensory quality of ready-to-eat shredded orange and purple carrots. *Food Chemistry*, v. 89, p. 69–76, 2005

OLIVEIRA, R. A. G.; LIMA, E. O.; VIEIRA, W. L.; FREIRE, K. R. L.; TRAJANO, V. N.; LIMA I. O.; SOUZA, E. L.; TOLEDO, M. S.; FILHO, R. N. S. Estudo da Interferência de Óleos Essenciais sobre a Atividade de Alguns Antibióticos Usados na Clínica. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, Curitiba, v.16, n. 1, p. 77-82, 2006.

FILHO, André Luiz M.; PEREIRA, Maria Renata Rocha. Atividade antimicrobiana de óleos extraídos de açaí e de pupunha sobre o desenvolvimento de *Pseudomonas aeruginosa* e *Staphylococcus aureus*. *Biosci. j.(Online)*, p. 598-603, 2012.

MENDONÇA, D. E.; ONOFRE, S. B. Atividade antimicrobiana do óleo-resina produzido pela copaiba *Copaifera multijuga* Hayne (Leguminosae). *Revista Brasileira de Farmacognosia*, João Pessoa, v. 19 n. 2b, 2009.

SILVA, Iago Castro da et al. Evaluation of the Antimicrobial Capacity of Bacteria Isolated from Stingless Bee (*Scaptotrigona aff. postica*) Honey Cultivated in Açaí (*Euterpe oleracea*) Monoculture. *Antibiotics*, v. 12, n. 2, p. 223, 2023.

ROGEZ, Hervé et al. Kinetic modeling of anthocyanin degradation and microorganism growth during postharvest storage of açaí fruits (*Euterpe oleracea*). *Journal of food science*, v. 77, n. 12, p. C1300-C1306, 2012.

MAIA FILHO, Milton et al. Ensaio de viabilidade celular da nanoemulsão de óleo de açaí (*Euterpe Precatoria* Mat.) e castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa* Bonp) em células C6 e gliais. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, v. 16, n. 49, p. 3990-4005, 2023.

ROCHA, S. M. B. M.; OLIVEIRA, A. G.; COSTA, M. C. D. Benefícios funcionais do açaí na prevenção de doenças cardiovasculares. *Journal of Amazon Health Science*, v. 1, n. 1, p. 1-10, 2015

Komaiko, J. S., & McClements, D. J. (2016). Formação de nanoemulsões de grau alimentício usando métodos de baixa energia: uma revisão dos métodos disponíveis. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(2), 331–352

BARROS GOMES, Paulo Roberto et al. Caracterização química e citotoxicidade do óleo essencial do cravo-da-índia (*Syzygium aromaticum*). *Revista Colombiana de Ciências Químico-Farmacêuticas*, v. 47, n. 1, p. 37-52, 2018.

OLIVERO-VERBEL, Jesus et al. Chemical composition and antioxidant activity of essential oils isolated from Colombian plants. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, v. 20, p. 568-574, 2010.

SILVA, Jonas Joaquim Mangabeira da; ROGEZ, Hervé. Avaliação da estabilidade oxidativa do óleo bruto de açaí (*Euterpe oleracea*) na presença de compostos fenólicos puros ou de extratos vegetais amazônicos. *Química Nova*, v. 36, p. 400-406, 2013.

ALVES, Maria José et al. Atividade antibacteriana de sementes de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.). In: II Congresso Internacional de Saúde Gaia-Porto- " Do Diagnóstico à Intervenção". 2015.

Miller, N.; Rice-Evans, C.; Davies, M.; Gopinathan, V.; Milner, A. A novel method for measuring antioxidant capacity and its application to monitoring the antioxidant status in premature neonates. *Clin Sci*. 1993, 84: 407-412

SOUZA, MO de et al. Açaí (*Euterpe oleraceae* Martius): chemical composition and bioactivity. 2011.

SCHAUSS, A. G.; WU, X.; PRIOR, R. L.; OU, B.; PASTEL, D.; HUANG, D.; KABABICK, J. P. Phytochemical and nutrient composition of the freeze-dried Amazonian Palm Berry, *Euterpe oleraceae* Mart. (Acai). *J Agric Food Chem.*, v. 54, n. 22, p. 8598-8603, Nov 2006

MATTHAN, N. R.; DILLARD, A.; LECKER, J. L.; IP, B.; LICHTENSTEIN, A. H. Effects of Dietary Palmitoleic Acid on Plasma Lipoprotein Profile and Aortic Cholesterol Accumulation Are Similar to Those of Other Unsaturated Fatty Acids in the F1B Golden Syrian Hamster. *J Nutr.*, v. 139, n. 2, p. 215-221, Feb 2009

PAGKALOS, V. A.; MOSCHANDREAS, J.; KIRIAKAKIS, M.; ROUSSOMOUSTAKAKI, M.; KAFATOS, A.; KOUROUMALIS, E. Fatty acid composition of subcutaneous adipose tissue and gastric mucosa: is there a relation with gastric ulceration? *BMC Gastroenterol.*, v. 9, p. 9, Jan 2009

FERNANDEZ, M. L.; WEST, K. L. Mechanisms by which dietary fatty acids modulate plasma lipids. *J Nutr.*, v. 135, n. 9, p. 2075-2078, Sept 2005

OSTLUND JR., R. E. Phytosterols and cholesterol metabolism. *Curr Opin Lipidol.*, v. 15, n. 1, p. 37-41, Feb 2004

CIDREIRA, Anne Carolyne Mendonça. Extração de derivados lignocelulósicos a partir da biomassa residual do açaí (*Euterpe oleracea*). 2019.

JENSEN, Claus Uhrenholt et al. Fundamentals of Hydrofaction™: Renewable crude oil from woody biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 7, n. 4, p. 495-509, 2017.

KIM J-S. Production, separation and applications of phenolic-rich bio-oil review. *Bioresour Technol.*, v.178. p. 90–98. 2015

MACHADO, M. A. Produção e Tratamento Catalítico de Bio-Óleo Produzido a partir da Pirólise do Bagaço de Cana-de-Açúcar. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Química. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013

KOLACZKOWSKA E., KUBES P. Neutrophil recruitment and function in health and inflammation. *Nature Rev Immunol* 2013; 13:159— 17

CARVALHO, I et al. Avaliação das atividades antimicrobiana e antioxidante do óleo essencial de Aniba rosaeodora Ducke (Pau rosa). 2021.

ALCÂNTARA, Allana Leão et al. Avaliação da atividade antimicrobiana do óleo extraído da cápsula do Eucalyptus urograndis: uma contribuição significativa para o ramo farmacêutico. ID on line. *Revista de psicologia*, v. 13, n. 43, p. 455-468, 2019.

CORREA, Leonardo Tibiriçá et al. Atividade antimicrobiana do óleo essencial de Melaleuca e sua incorporação em um creme mucocutâneo. *Revista Fitos*, v. 14, n. 1, p. 26-37, 2020.

MONTEIRO, Ana Rita Pinto. Atividade antimicrobiana de óleos essenciais. 2015. Tese de Doutorado. Universidade Fernando Pessoa (Portugal).

BREIDENSTEIN, E.B.M., Fuente-Núñez, C., Hancock, R.E.W. (2011). *Pseudomonas aeruginosa: all roads lead to resistance*. *Trends in Microbiology*, volume 19(8). pp. 419 – 426

Fair, R.J., Tor, Y. (2014). *Antibiotics and Bacterial Resistance in the 21st Century*. *Perspectives in Medicinal Chemistry*, volume 6. pp. 25–64

DJ den Heijer, C., et al. (2013). Prevalence and resistance of commensal *Staphylococcus aureus*, including methicillin-resistant *S aureus*, in nine European countries: a cross-sectional study. *The lancet Infectious Diseases*, volume 13(5). pp. 409 - 415

BEKER, Sabrina Anderson. Avaliação do potencial antimicrobiano de TBHQ (terc-butil-hidroquinona) e de bio-óleo para uso em biodiesel de soja (B100) e óleo diesel B (B10). 2014.

MOURANT, D.; YANG, X. D.-Q.; ET AL. Anti-fungal properties of the pyroligneous liquor from the pyrolysis of softwood bark. *Wood Fiber Sci.*, v. 73, p. 542–548, 2005

MOHAN, D., SHI, J., NICHOLAS, D.D., PITTMAN JR., C.U., STEELE, P.H., COOPER, J.E. Fungicidal values of bio-oils and their lignin-rich fractions obtained from wood/bark fast pyrolysis. *Chemosphere*, v. 71, p. 456–465. 2008

CHAPMAN, J. S. Biocide resistance mechanisms. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 51, n. 2, p. 133-138, 2003

MAZELA, B. Fungicidal value of wood tar from pyrolysis of treated wood. *Waste Management*, v. 27, p. 461–465, 2006.

KIM, K. H.; JEONG, H. S.; KIM, J. Y.; HAN, G. S.; CHOI, I. G.; CHOI, J. W. Evaluation of the antifungal effects of bio-oil prepared with lignocellulosic biomass using fast pyrolysis technology. *Chemosphere*, v. 89, p. 688–693, 2012

LAI, P. K.; ROY, J. Antimicrobial and chemo-preventive properties of herbs and spices. *Curr. Med. Chem*, v. 11, p. 1451–1460, 2004.

XUE, J.; DAVIDSON, P. M.; ZHONG, Q. Thymol nanoemulsified with whey protein isolate-maltodextrin conjugate: the enhanced emulsifying capacity and anti-listerial properties in milk by propylene glycol. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* . v. 61, n. 51, p. 12720–12726, 2013

FARAG, R. S., DAW, Z. Y., HEWEDI, F. M., & EL-BAROTY, G. S. A. Antimicrobial activity of some Egyptian spice essential oils. *Journal of Food Protection*, v.52, p. 665–667, 1989

CHAPMAN, J. S. Biocide resistance mechanisms. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 51, n. 2, p. 133-138, 2003.

OLIVEIRA, Ana Florise Morais et al. Atividade antimicrobiana de óleos essenciais frente a bactérias patogênicas de importância clínica. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 13, p. e448111335639-e448111335639, 2022.

Puvača, N., Milenković, J., Coghill, T. G., Bursić, V., Petrović, A., Tanasković, N., Pelić, M., Pelić, D. L., & Miljković, T. (2021). Antimicrobial Activity of Selected Essential Oils against Selected Pathogenic Bacteria: In Vitro Study, *Antibiotics*, 10(5), 1-14. [10.3390/antibiotics10050546](https://doi.org/10.3390/antibiotics10050546)

Pombo, J. C. P., Ribeiro, E. R., Pinto, R. De L., & Da Silva, B. J. M. (2018). Efeito antimicrobiano e sinérgico de óleos essenciais sobre bactérias contaminantes de alimentos, *Rev. Segur. Aliment. Nutr.*, 25(2), 108-117. [10.20396/san.v25i2.8651785](https://doi.org/10.20396/san.v25i2.8651785)

TRAJANO, Vinicius Nogueira et al. Propriedade antibacteriana de óleos essenciais de especiarias sobre bactérias contaminantes de alimentos. *Food Science and Technology*, v. 29, p. 542-545, 2009.

MÍMICA-DUKIĆ, Neda et al. Antimicrobial and antioxidant activities of three *Mentha* species essential oils. *Planta médica*, v. 69, n. 05, p. 413-419, 2003.

VALOIS, Flávio Pinheiro et al. Improving the Antioxidant Activity, Yield, and Hydrocarbon Content of Bio-Oil from the Pyrolysis of Açaí Seeds by Chemical Activation: Effect of Temperature and Molarity. *Catalysts*, v. 14, n. 1, p. 44, 2024.

DE SOUSA, J.L.; Guerreiro, L.H.H.; Bernar, L.P.; Ribeiro, H.J.D.S.; e Oliveira, R.L.; Santos, M.C.; Almeida, H.D.S.; Junior, S.D.; Borges, L.E.P.; Castro, D.A.R.; et al. Chemical Analysis of Bio-Oil Produced by Pyrolysis of Açaí (*Euterpe oleracea*, Mart) Seeds. *Braz. J. Dev.* 2021, 7, 15549–15565

Bernar, L.P.; Ferreira, C.C.; Costa, A.F.D.F.; Ribeiro, H.J.D.S.; dos Santos, W.G.; Pereira, L.M.; Pereira, A.M.; Moraes, N.L.; Assunção, F.P.D.C.; Mota, S.A.P.D.; et al. Catalytic Upgrading of Residual Fat Pyrolysis Vapors over Activated Carbon Pellets into Hydrocarbons-like Fuels in a Two-Stage Reactor: Analysis of Hydrocarbons Composition and Physical-Chemistry Properties. *Energies* 2022, 15, 4587. [CrossRef]

Ferreira, C.C.; Bernar, L.P.; de Freitas Costa, A.F.; da Silva Ribeiro, H.J.; Santos, M.C.; Moraes, N.L.; Costa, Y.S.; Baia, A.C.F.; Mendonça, N.M.; da Mota, S.A.P.; et al.

Improving Fuel Properties and Hydrocarbon Content from Residual Fat Pyrolysis Vapors over Activated Red Mud Pellets in Two-Stage Reactor: Optimization of Reaction Time and Catalyst Content. *Energies* 2022, 15, 5595

MAHADEVAN, R.; ADHIKARI, S.; SHAKYA, R.; WANG, K.; DAYTON, D.; LEHRICH, M.; Taylor, S.E. Effect of Alkali and Alkaline Earth Metals on in-Situ Catalytic Fast Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass: A Microreactor Study. *Energy Fuels* 2016, 30, 3045–3056. [CrossRef]

Yang, C.-Y.; Lu, X.-S.; Lin, W.-G.; Yang, X.-M.; Yao, J.-Z. TG-FTIR Study on Corn Straw Pyrolysis-influence of Minerals. *Chem. Res.Chin. Univ.* 2006, 22, 524–532. [CrossRef]

PATWARDHAN, P.R.; SATRIO, J.A.; BROWN, R.C.; SHANKS, B.H. Influence of inorganic salts on the primary pyrolysis products of cellulose. *Bioresour. Technol.* 2010, 101, 4646–4655. [CrossRef]

SIMAKOVA, I.L.; Murzin, D.Y. Transformation of bio-derived acids into fuel-like alkanes via ketonic decarboxylation and hydrodeoxygenation: Design of multifunctional catalyst, kinetic and mechanistic aspects. *J. Energy Chem.* 2016, 25, 208–224. [CrossRef]

SOUZA, Rafael da Silva. Avaliação da composição de bio-óleos produzidos empregando resíduos de acerola. (Trabalho de conclusão de curso). UEMGS, 2015

GOIS, Antonia Regina dos Santos. Desenvolvimento de metodologia para quantificação de fenóis presentes em fração aquosa de pirólise por GC/MS e UHPSFC. 2021.

SILVA, Jefferson David Oliveira da. Pirólise da biomassa residual da acerola (*Malpighia emarginata*) e avaliação de seus produtos. Dissertação de Mestrado. UFS, 2019.

SANTOS, Vanuza Oliveira et al. Pirólise da biomassa Amazônica: parâmetros cinéticos e termodinâmicos usando análise termogravimétrica. 2022

COSTA, Diego Magalhães. Estudo de bio-óleos de sorgo biomassa obtidos via pirólise catalítica rápida. 2016.

SUPING ZHANG, YONGJIE YAN, TINGCHEN LI, ZHENGWEI REN. Upgrading of liquid fuel from the pyrolysis of biomass. *Bioresour. Technol.* 96 (2005) 545-550, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.015> 918 72.

CRISTIAN TORRI, DANIELE FABBRI. Biochar enables anaerobic digestion of aqueous phase from intermediate pyrolysis of biomass. *Bioresour. Technol.* 172 (2014).

Haoqin Zhou, Robert C. Brown, Zhiyou Wen. Anaerobic digestion of aqueous phase from pyrolysis of biomass: Reducing toxicity and improving microbial tolerance. *Bioresour. Technol.* 292 (2019) 121976, 922 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121976>

RODRIGUES, Gabriella Silva; SANTOS, Naiane Oliveira; FORTUNA, Jorge Luiz. Atividade antimicrobiana do óleo essencial de *Cymbopogon citratus* (DC) Stapf.(Capim-Santo) sobre *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*. Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente [Internet], 2020.

SILVA, F.L., SUGAUARA, E.Y.Y., MAGALHÃES, H.M., PASCOTTO, C.R., COLAUTO, N.B., LINDE, G.A. & GAZIM, Z.C., 2014. Atividade antimicrobiana do óleo essencial de *Cymbopogon citratus*. Arquivos de Ciências Veterinárias e Zoologia, vol. 17, no. 3, pp. 181-184. <https://www.revistas.unipar.br/index.php/veterinaria/article/view/4942>

CONTRUCCI, Bruno Antunes et al. Efeito de óleos essenciais sobre bactérias gram-negativas isoladas de alimentos. Ensaio e Ciência C Biológicas Agrárias e da Saúde, v. 23, n. 3, p. 180-184, 2019.

SAVIUC, C. et al. Rosmarinus officinalis essential oil and eucalyptol act as efflux pumps inhibitors and increase ciprofloxacin efficiency against *Pseudomonas aeruginosa* and *Acinetobacter baumannii* MDR Strains. Romanian Biotechnol. Lett., v.21, n.4, p.11782-11790, 2016.

SIENKIEWICZ, M. et al. The biological activities of Cinnamon, Geranium and Lavender essential oils. Molecules, v.19, n.12, p.20929-20940; 2014. doi:10.3390/molecules191220929

YAP, P.S.X. et al. Essential oils, a new horizon in combating bacterial antibiotic resistance. Open Microbiol. J., v.8, p.6–14, 2014. doi: 10.217/1874285801408010006

RochadeCastro, D.A.; da Silva Ribeiro, H.J.; Hamoy Guerreiro, L.H.; Pinto Bernar, L.; Jonatan Bremer, S.; Costa Santo, M.; da Silva Almeida, H.; Duvoisin, S., Jr.; Pizarro Borges, L.E.; Teixeira Machado, N. Production of Fuel-Like Fractions by Fractional Distillation of Bio-Oil from Açai (*Euterpe oleracea* Mart.). Seeds Pyrolysis. Energ. 2021, 14, 3713

FREIRE, I. C. M. et al. Atividade antibacteriana de Óleos Essenciais sobre *Streptococcus mutans* e *Staphylococcus aureus*. Revista Brasileira de Plantas Mediciniais, v. 16, p. 372-377, 2014.

COSTA, C.M.G.R.; SANTOS, M.S.; BARROS, H.M.M.; AGRA, P.F.M.; FARIAS, M.A.A. Efeito inibitório do óleo essencial de manjeriço sobre o crescimento in vitro de *Erwinia carotovora*. Tecnologia & Ciência Agropecuária, v.3, n.3, p.35-38, 2009

FERENZ, Mariane et al. Ação Antimicrobiana de Óleos Essenciais Contra *Staphylococcus Aureus* e *Pseudomonas Aeruginosa*. Blucher Food Science Proceedings, v. 1, n. 1, p. 35-36, 2014.

MASHIBA, Leandro Nozomi; MAGALHÃES, Washington Luiz Esteves; MATOS, M. de. Determinação da atividade antioxidante e antimicrobiana das frações da lignina pirolítica. 2019

ARAÚJO, I. D. et al. Chemical composition and evaluation of the antibacterial and cytotoxic activities of the essential oil from the leaves of *Myracrodruon urundeuva*. BMC Complementary and Alternative Medicine, v. 17, n. 1, p. 419, 2017. DOI

SANTOS, F. M. et al. Chemical composition and antimicrobial activity of the essential oil from the leaves and flowers of *Aloysia gratissima*. *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, v. 15, n. 4, p. 583-588, 2013.

SCHERER, R. et al. Composição e atividades antioxidante e antimicrobiana dos óleos essenciais de cravo-da-índia, citronela e palmarosa. *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, v. 11, n. 4, p. 442-449, 2009

TRAJANO, V. N. et al. Inhibitory effect of the essential oil from *Cinnamomum zeylanicum* Blume leaves on some food-related bacteria. *Ciências Tecnologia de Alimentos*, v. 30, n. 3, p. 771-775, 2010.

ARBOS, K. A.; STEVANI, P. C.; CASTANHA, R. D. F. Atividade antimicrobiana, antioxidante e teor de compostos fenólicos em casca e amêndoa de frutos de manga. *Revista Ceres*, v. 60, p. 161-165, 2013

DEUS, V. L.; SANTOS, A. P. C.; WALKER, J. F.; NETA, L. S.; SOUZA, L. S. Compostos fenólicos em hortaliças cultivadas nos sistemas convencional e orgânico: uma revisão. *Brazilian Journal of Health and Pharmacy*, v. 1, n. 1, p. 70-84, 2019.

SANTOS, D. K. D. D. N. Investigação do potencial antioxidante, imunomodulatório e toxicológico de fração rica em compostos fenólicos e de lignina e pectina isoladas de *Conocarpus erectus* L.(Combretaceae). 2021

VALDEZ, G. D.; VALOIS, F. P.; BREMER, S. J.; BEZERRA, K. C. A.; GUERREIRO, L. H.; SANTOS, M. C.; MACHADO, N. T. Improving the Bio-Oil Quality of Residual Biomass Pyrolysis by Chemical Activation: Effect of Alkalis and Acid Pre-Treatment. *Energies*, v. 16, n. 7, p. 3162, 2023

PEREIRA, R. R.; GOMES, A. T.; TESTI, M.; BIANCHERA, A.; RIBEIRO-COSTA, R. M.; PADULA, C.; SONVICO, F. Ucuúba Fat Characterization and Use to Obtain Lipid Nanoparticles by High-Pressure Homogenization with Full Factorial Design. *Chemical Engineering & Technology*, v. 44, n. 6, p. 1009-1016, 2021

Piyali Das, Anuradda Ganesh. Bio-oil from pyrolysis of cashew nutshell—a near fuel. *Biomass and Bioenergy*, Volume 25, Issue 890 1, July 2003, 113-117 891

M. Asadullah; M. A. Rahman; M. M. Ali; M. S. Rahman; M. A. Motin; M. B. Sultan; M. R. Alam. Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. *Fuel* Volume 86, Issue 16, November 2007, 2514-2520 893

Zheng Ji-lu. Bio-oil from fast pyrolysis of rice husk: Yields and related properties and improvement of the pyrolysis system. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 80 (2007) 30–35 895

Mohamad Azri Sukiran, Chow Mee Chin, Nor Kartini Abu Bakar. Bio-oils from Pyrolysis of Oil Palm Empty Fruit Bunches. *American Journal of Applied Sciences* 6 (5): 869-875, 2009

Anil Kumar Varma; Prasenjit Mondal. Pyrolysis of sugarcane bagasse in semi batch reactor: Effects of process parameters on product yields and characterization of products. *Industrial Crops and Products* 95 (2017) 704–717

Bernar, L.P.; Ferreira, C.C.; Costa, A.F.d.F.; Ribeiro, H.J.d.S.; dos Santos, W.G.; Pereira, L.M.; Pereira, A.M.; Moraes, N.L.; 752 Assunção, F.P.d.C.; Mota, S.A.P.d.; et al. Catalytic Upgrading of Residual Fat Pyrolysis Vapors over Activated Carbon Pellets 753 into Hydrocarbons-like Fuels in a Two-Stage Reactor: Analysis of Hydrocarbons Composition and Physical-Chemistry Proper- 754 ties. *Energies* 2022, 15, 4587.

Ferreira, C.C.; Bernar, L.P.; de Freitas Costa, A.F.; da Silva Ribeiro, H.J.; Santos, M.C.; Moraes, N.L.; Costa, Y.S.; Baia, A.C.F.; 756 Mendonça, N.M.; da Mota, S.A.P.; et al. Improving Fuel Properties and Hydrocarbon Content from Residual Fat Pyrolysis Va- 757 pors over Activated Red Mud Pellets in Two-Stage Reactor: Optimization of Reaction Time and Catalyst Content. *Energies* 2022, 758 15, 5595.

LEÃO, R. M. Tratamento superficial de fibra de coco e aplicação em materiais compósitos como reforço do polipropileno. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Brasília-DF. 2012

WANG, SHURONG; CAI, QINJIE; WANG, XIANGYU; LI ZHANG; YURONG WANG; ZHONGYANG LUO. Biogasoline production from the co-cracking of the distilled fraction of bio-oil and ethanol. *Energy Fuels*, 2014, 28 (1), 115–122

DE FREITAS, Carlos Eduardo Pereira et al. Estudo in vitro da Atividade Antioxidante por captura do radical livre DPPH e análise da atividade fotoprotetora do óleo de castanha-do-Pará extraído com solvente alternativo. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 52411-52423, 2021.

OLIVEIRA, Sara Dayan da Silva. Atividade antioxidante dos óleos essenciais de genótipos de *Croton grewoides* Baill, *Croton tetradenius* Baill e seus compostos majoritários. 2018.

CALEJA, C. et al. Phenolic compounds as nutraceuticals or functional food ingredients. *Current pharmaceutical design*. v. 23, n. 19, p. 2787-2806, 2017

ESPÍNDOLA, K.M.M; FERREIRA, R.G; NARVAEZ, L.E.M; SILVA ROSARIO, A.C.R; DA SILVA, A.H.M; SILVA, A.G.B; VIEIRA, A.P.O; MONTEIRO, M.C. Chemical and Pharmacological Aspects of Caffeic Acid and Its Activity in Hepatocarcinoma. *Front Oncol*. 21;9:541, 2019.

Albuquerque BR, Heleno SA, Oliveira MBPP, Barros L, Ferreira ICFR. Phenolic compounds: current industrial applications, 924 limitations and future challenges. *Food Funct*. 2021 Jan 7;12(1):14-29. <http://doi.org/10.1039/d0fo02324h>

Chen, W.; Li, K.; Chen, Z.; Xia, M.; Chen, Y.; Yang, H.; Chen, X.; Chen, H. A new insight into chemical reactions between biomass

and alkaline additives during pyrolysis process. *Proc. Combust. Inst.* 2021, 38, 3881–3890. [CrossRef]

SAGDIC, O. et al. Note: effect of some spice extracts on bacterial inhibition. **Food science and technology international**, v. 9, n. 5, p. 353-358, 2003.

CATALUÑA, R; KUAMOTO, P; PETZHOLD, C.; CARAMAO, E.; MACHADO, M. E. ; SILVA, R. Using Bio-oil Produced by Biomass Pyrolysis as Diesel Fuel. *Energy & Fuels*, v. 27, p. 6831–6838, 2013

Del Pozo C, Bartrolí J, Alier S, Puy N, Fàbregas E. Production of antioxidants and other value-added compounds from coffee 813 silver skin via pyrolysis under a biorefinery approach. *Waste Manag.* 2020 May 15;109:19-27

RE, R.; PELEGRINI, N.; PROTEGGENTE, A.; PANNALA, A.; YANG, M.; RICEEVANS, C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. **Free Radical biology & medicine**, New York, v.26,n.9-10,p.1231-1237,1999.

BRAND-WILLIAMS, Wendy; CUVELIER, Marie-Elisabeth; BERSET, C. L. W. T. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. **LWT-Food science and Technology**, v. 28, n. 1, p. 25-30, 1995

ALBANO, Mariana. Atividade antibacteriana e anti-enterotoxinas de compostos fenólicos sobre bactérias de interesse clínico. 2016.

GILL, A. O.; HOLLEY, R. A. Disruption of *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* and *Lactobacillus sakei* cellular membranes by plant oil aromatics. *International Journal of Food Microbiology*, v. 108, n. 1, p. 1-9, 2006.

NAZZARO, F. et al. Effect of essential oils on pathogenic bacteria. *Pharmaceuticals*, v. 6, n. 12, p. 1451-1474, 2013.

TURINA, A. D. V. et al. Natural terpenes: self-assembly and membrane partitioning. *Biophysical Chemistry*, v. 122, n. 2, p. 101-113, 2006.

MROZIK, A.; PIOTROWSKA-SEGET, Z; ŁABUŹEK, S. Changes in whole cell-derived fatty acids induced by naphthalene in bacteria from genus *Pseudomonas*. *Microbiological Research*, v. 159, n. 1, p. 87-95, 2004.

BURT, S. A. et al. Carvacrol induces heat shock protein 60 and inhibits synthesis of flagellin in *Escherichia coli* O157: H7. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 73, n. 14, p. 4484- 4490, 2007.

GYAWALI, R.; IBRAHIM, S. A. Natural products as antimicrobial agents. *Food Control*, v. 46, p. 412-429, 2014.

SANTOS, Matheus Maciel; PASOLINI, Fernanda Souza; COSTA, Ana Paula Oliveira. Caracterização físico-química do caroço e da fibra do açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) via métodos clássicos e instrumentais. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 9, n. 2, p. 143-160, 2023.

Sato, M. K., Lima, H. V., de., Costa, A. N., Rodrigues, S., Pedroso, A. J. S., & Maia, C. M. B. de F. (2019). Biochar from açaí agroindustry waste: study of pyrolysis conditions. *Waste Management*, 96(1), 158-167.

Oliveira, J. A. R. de, Passos, M. F., & Conceição, A. C. da. (2020). Alkaline Hydrogen Peroxide Pretreatment of Açaí Seeds Waste (Asw) for Fermentable Sugars and

Ethanol Production. International Journal of Advances in Engineering & Technology - IJAET, 13(2), 49-56

## 8. COMPROVANTE DE SUBMISSÃO/ACEITE DE ARTIGO CIENTÍFICO

[IJMS] Manuscript ID: ijms-3163362 - Submission Received ☰ Caixa de entrada x

Editorial Office <ijms@mdpi.com>

para Nelio, mim, Pamela, Kely, Ricardo, Alanna, Amanda, Giovanna, Alexandre, Rayane, Leticia, Thays, Lauro, Marta ▼

 Traduza para o português



Dear Professor Machado,

Thank you very much for uploading the following manuscript to the MDPI submission system. One of our editors will be in touch with you soon.

Journal name: International Journal of Molecular Sciences

Manuscript ID: ijms-3163362

Type of manuscript: Article

Title: Effect of temperature and molarity on the evaluation of antimicrobial, cytotoxic, and antioxidant activities of the bio-oil from açai seed (Euterpe oleracea, Mart.)

Authors: Iago Castro da Silva, Pamela Suelen da Silva Seabra, Kely Campos Navegantes Lima, Ricardo Barbosa Bezerra Filho, Alanna Lorena P. dos Santos, Amanda Caroline dos Santos Monteiro, Giovanna Quintero Pamplona, Alexandre Guilherme da Silva Dias, Rayane Caroline dos Santos Pereira, Leticia Araujo Costa, Thays Jhessica Mota Pinheiro, Lauro Henrique Hamoy Guerreiro, Nélcio Teixeira Machado, Marta Chagas Monteiro \*

Received: 1 Aug 2024

E-mails: [castroiago95@gmail.com](mailto:castroiago95@gmail.com), [pamela.seabra@ics.ufpa.br](mailto:pamela.seabra@ics.ufpa.br), [profkelynavelima@gmail.com](mailto:profkelynavelima@gmail.com), [ricardo.filho@ics.ufpa.br](mailto:ricardo.filho@ics.ufpa.br), [alannalorenamentels@gmail.com](mailto:alannalorenamentels@gmail.com), [amanda.monteiro@ics.ufpa.br](mailto:amanda.monteiro@ics.ufpa.br), [giovanna.pamplona@ics.ufpa.br](mailto:giovanna.pamplona@ics.ufpa.br), [alexandre.dias@ics.ufpa.br](mailto:alexandre.dias@ics.ufpa.br), [rayane.pereira@ics.ufpa.br](mailto:rayane.pereira@ics.ufpa.br), [leticia.araujo.costa@itec.ufpa.br](mailto:leticia.araujo.costa@itec.ufpa.br), [thaysjhessica7@gmail.com](mailto:thaysjhessica7@gmail.com), [guerreirolauroengq@gmail.com](mailto:guerreirolauroengq@gmail.com), [machado@ufpa.br](mailto:machado@ufpa.br), [martachagas@ufpa.br](mailto:martachagas@ufpa.br)

Bioactives and Nutraceuticals

<https://www.mdpi.com/journal/ijms/sections/bioactives>

Antibacterial and Antioxidant Effects of Plant-Sourced Compounds

[https://www.mdpi.com/journal/ijms/special\\_issues/SK46RGU4IT](https://www.mdpi.com/journal/ijms/special_issues/SK46RGU4IT)